

doi: 10.12029/gc20230901003

陈东方, 杨跃辉, 牛兆轩, 王红伟, 金显鹏, 李振宇, 吴海东, 刘东林. 2025. 青海共和盆地干热岩 GR2 井现今地应力特征及断层稳定性分析[J]. 中国地质, 52(2): 425–437.

Chen Dongfang, Yang Yuehui, Niu Zhaoxuan, Wang Hongwei, Jin Xianpeng, Li Zhenyu, Wu Haidong, Liu Donglin. 2025. In-situ stress characteristics and fault stability analysis of hot dry rock GR2 well in the Gonghe Basin, Qinghai[J]. Geology in China, 52(2): 425–437(in Chinese with English abstract).

青海共和盆地干热岩 GR2 井现今地应力特征 及断层稳定性分析

陈东方^{1,2,3}, 杨跃辉⁴, 牛兆轩^{1,2,3}, 王红伟^{1,2,3}, 金显鹏^{1,2,3}, 李振宇⁵, 吴海东^{1,2,3},
刘东林^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300309; 2. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 天津 300309; 3. 天津市地热资源勘查开发工程研究中心, 天津 300309; 4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 5. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:【研究目的】地应力大小和方向是干热岩开发中井位部署、压裂设计和储层评价等方面的重要基础数据, 研究储层应力状态对干热岩开发具有重要意义。【研究方法】本文根据区域地质构造演化、震源机制解反演结果、节理裂隙统计、原地应力实测数据分析了共和盆地区域应力场的特征, 结合共和 GR2 地热井储层构造、地层岩性特点建立三维模型, 利用正交各向异性弹性本构关系, 通过数值模拟获取了共和盆地 GR2 井的三维地应力数据, 探讨了区域构造应力场及干热岩注水开发与断层稳定性。【研究结果】①模拟所得地应力分布与理论值吻合, 满足初始位移精度要求, 最终预估了井中地应力场分布特征; ②在 500~4500 m 深度范围内, 三向主应力总体表现为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$, 表明该区域应力结构有利于正断层活动; ③青海共和盆地最大水平主应力方向整体上呈北东(NE)向挤压变形作用为主, 有利于花岗岩岩体具有低的流体渗透率、低的热流传导。④在统一的区域地应力场作用下, 研究区 3900~4500 m 干热岩注水开发过程中, 当地面持续注入压力达到或超过约 19.9 MPa 时, 可能引起场区内断层的滑动失稳, 导致中小地震的发生, 在干热岩开发利用中需注意防范。【结论】研究结果对共和盆地地球动力学研究及干热岩安全开发利用具有一定参考价值。

关键词: 干热岩开发; 地应力; 三维数值模拟; 断层活动性; 地质调查工程; 共和盆地; 青海省

创新点: (1) 基于地质构造演化、震源机制解反演、节理裂隙统计、地应力实测数据系统分析了共和盆地区域应力场特征; (2) 采用数值模拟方法获取了干热岩 GR2 井地应力数据, 对干热岩研究区断层的稳定性进行分析并从干热岩开发的角度定量评价了注水压力对附近断层稳定性的影响。

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0425-13

In-situ stress characteristics and fault stability analysis of hot dry rock GR2 well in the Gonghe Basin, Qinghai

收稿日期: 2023-09-01; 改回日期: 2023-11-09

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB1507404)及中国地质调查局项目(DD20211336、DD20230018)联合资助。

作者简介: 陈东方, 男, 1992 年生, 工程师, 主要从事构造应力场和岩石力学方面的工作; E-mail: chendongfang@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 金显鹏, 男, 1983 年生, 高级工程师, 主要从事干热岩开发方面的工作; E-mail: jinxp@mail.cgs.gov.cn。

CHEN Dongfang^{1,2,3}, YANG Yuehui⁴, NIU Zhaoxuan^{1,2,3}, WANG Hongwei^{1,2,3}, JIN Xianpeng^{1,2,3},
LI Zhenyu⁵, WU Haidong^{1,2,3}, LIU Donglin^{1,2,3}

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Tianjin 300309, China; 2. Technical Innovation Center for Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300309, China; 3. Tianjin Engineering Center of Geothermal Resources Exploration and Development, Tianjin 300309, China; 4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 5. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] The magnitude and direction of in-situ stress are important parameters for well placement, fracturing design and reservoir evaluation in hot dry rock development. It is of great significance to study reservoir stress state for hot dry rock development. **[Methods]** In this paper, the characteristics of current stress field in the Gonghe Basin are analyzed based on regional geological structure evolution, focal mechanism solution and inversion results, statistics of joints and fissures, and in-situ stress measured data. Combined with the reservoir structure and stratigraphic lithofacies characteristics of GR2 well, a three-dimensional model is established, and the three-dimensional in-situ stress data of GR2 well in the Gonghe Basin is obtained through numerical simulation by using orthogonal anisotropic elastic constitutive relation. The regional tectonic stress field and occurrence conditions of dry hot rock resources are discussed. **[Results]** ① The simulated stress distribution is consistent with the theoretical value, which meets the requirements of initial displacement accuracy, and finally predicts the distribution characteristics of in-situ stress field in the well. ② In the depth range of 500–4500 m, the relationship of three principal stresses is principal stress is $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$, indicating that the stress structure in this region is favorable to normal fault activity. ③ The maximum horizontal principal stress direction of the Gonghe Basin in Qinghai province is mainly NE direction compression deformation, which is conducive to low fluid permeability and low heat transfer of granite. ④ Under the action of a unified regional stress field, the faults may be come instability near the injecting well, when the continuous injection pressure on the ground reaches or exceeds about 19.9 MPa during the water injection development of 3900–4500 m depth in the study area, leading to the occurrence of medium and small earthquakes, which should be prevented in the development and utilization of the hot dry rock. **[Conclusions]** The research results have certain reference value for geodynamics research and the safe development and utilization of dry hot rock in the Gonghe Basin.

Key words: the development of hot dry rock; in-situ stress; 3D numerical simulation; fault activity; geological survey engineering; the Gonghe Basin; Qinghai Province

Highlights: (1) The characteristics of regional stress field in the Gonghe Basin were analyzed based on geological structure evolution, focal mechanism solution inversion, joint fracture statistics and in-situ stress measurement data. (2) The in-situ stress data of hot dry rock GR2 well were obtained by numerical simulation, the stability of faults in the study area was analyzed, and the influence of water injection pressure on the stability of nearby faults was quantitatively evaluated from the perspective of hot dry rock development.

About the first author: CHEN Dongfang, male, born in 1992, engineer, mainly engaged in the the field of in-situ stress and rock mechanics-related work; E-mail: chendongfang@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: JIN Xianpeng, male, born in 1983, senior engineer, mainly engaged in hot dry rock development related work; E-mail: jinxp@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the National Key Research and Development Program (No.2021YFB1507404) and the projects of China Geological Survey (No.DD20211336, No.DD20230018).

1 引 言

干热岩是一种埋藏较深,岩体特征具有高温(温

度大于 150℃)、低渗透性的清洁可再生地热能资源(陆川和王贵玲, 2015; Lee et al., 2019; Zhang et al., 2022),地应力作为低渗透性高温岩体渗透率和储

层裂缝连通性的控制因素之一,涉及到干热岩开发中井位部署、压裂设计、储层评价和诱发地震评估等多个方面(王贵玲等, 2017; 上官拴通等, 2021)。储层初始地应力场直接决定了先存断层的初始稳定状态,间接影响注水诱发断层失稳的扰动效果(Feng et al., 2022)。同时原地应力状态是干热岩资源开发利用的重要基础数据,也是人们认识和理解区域构造应力场特征,分析干热岩资源赋存条件的重要依据(汪集旻等, 2012; 王贵玲等, 2017; 许天福等, 2018)。

原地应力主要由岩体自重、地质构造活动、热应力等因素引起(Amadei and stephansson, 1997; 何满潮等, 2005; 孙东生等, 2014)。近年来,人类对资源和能源需求量的增加和开采强度不断加大,国内外相继进入深部能源开发状态,一定程度上促进了地应力方法和研究的发展,而深部工程中的高温、高应力问题已成为深部开采中的难点问题(何满潮等, 2005; 王成虎, 2014)。因此,准确确定原地应力状态对深部工程研究及开发十分必要。现场实测地应力是了解应力场最直接的途径,工程上由于测试条件等因素限制,往往不能进行大量的现场测量(张重远等, 2012; 刘爱华等, 2013; 王成虎, 2014),因此,要想获得区域的地应力场分布情况,一般利用数理方法进行数值模拟(刘建等, 2021)。随着计算机的发展,数值模拟技术在地学领域广泛应用,目前,三维应力场数值模拟主要以实测位移或地应力实测值为参考,结合地质构造及岩性等物理特性计算地应力大小和方向(余志雄等, 2007; 何江达等, 2009; 王金安等, 2015)。而在地应力场的模拟过程中常因考虑的因素和参数不充分,导致模拟的结果不正确,如泊松效应被重复考虑导致初始位移,又难以消除其影响(王丽娟等, 2008; 刘爱华等, 2013)。

本文根据研究区地质概况以及野外地应力资料,利用有限元方法进行数值模拟,初始位移满足

精度要求,最终预估了井中地应力场分布特征,依据莫尔库伦破裂准则并结合拜尔利定律,对附近断裂的活动性进行了简要分析和讨论。

2 地质构造背景

共和盆地地处西秦岭、东昆仑、祁连、柴达木与欧龙布鲁克等多个构造带或块体交接转换的重要结点地区(图 1)(张国伟等, 2004; 张永明等, 2017),为新生代压陷型断陷盆地,是由华北板块、扬子板块、柴达木地块、秦岭微地块、青藏板块复杂作用形成的,其经历了从柴达木地块上的拗拉槽(陆相到陆表海相)到复理石前陆盆地再到陆内碰撞造山作用的演化过程(丁仁平, 2008; 任海东和王涛, 2017)。晚新生代以来,共和盆地甚至整个青藏高原受到来自印度板块北东向挤压隆升改造的影响(孙延贵等, 2007; 王二七等, 2009),盆地内新构造十分发育,主要表现为区域性差异隆升运动和新构造期形成的断裂与褶皱构造,因盆地周边山区大幅度抬升,海拔多在 3800 m 以上,而盆地则表现为相对沉降,海拔 2800~3200 m,并堆积了巨厚的第四纪堆积物。共和盆地内部构造变形多见于新近纪—第四纪沉积。

共和盆地基底由印支期花岗岩组成,本研究的 GR2 干热岩地热井位于青海省共和县境内,距离青海湖约 50 km,钻井深度达到 4000 m,于 945 m 处钻遇花岗岩,具体地层信息见表 1(李良振等, 2019),由于未开展地应力测量工作,所以可以根据野外节理裂隙地质调查、震源机制解来分析区域应力场特征。

3 区域应力场特征

3.1 区域露头岩体节理裂隙统计

在地质演变过程中,岩体受到挤压、拉张、扭转

表 1 共和干热岩分布区节理裂隙主应力方向统计

Table 1 Statistics of principal stress direction of joints and fractures in hot dry rock area of Gonghe Basin

位置	经度/°	纬度/°	最大主应力/°	岩性露头
达连海	100.41E	36.23N	NE 85	临夏组泥岩
千卜禄寺	100.46E	36.39N	NE 60	印支期花岗岩
沟后	100.58E	36.39N	NE 62	印支期花岗岩
阿乙亥	100.68E	36.21N	NE 73	共合组砂岩
龙羊峡	100.90E	36.15N	NE 75	印支期花岗岩
土林	100.83E	36.21N	NE 70	临夏组泥岩
党家寺	100.85E	36.29N	NE 72	印支期花岗岩

地应力作用,岩体中的节理裂隙是在这些地应力的作用下形成的,力学机制研究表明,大量的构造裂隙在区域构造应力场的作用下具有很强的统计规律。因此,通过野外调查统计区域内的露头岩体中的节理裂隙走向,可以一定程度上反映储层应力场方向。根据文献收集到的 80 处发育于不同时期的共和盆地节理裂隙点统计结果(表 1,图 1),发育于不同时期的露头岩体(印支期花岗岩、临夏组泥岩、共合组砂岩)中节理裂隙走向的优势方向具有较好的一致性,表明地层中的构造节理裂隙的力学成因机制具有较高的统一性,综合分析节理裂隙结果,得出最大主应力方向约为 NE73°(雷治红,2020)。

3.2 原地应力实测数据收集与整理

由于共和地区深部地应力实测资料匮乏,本文采用一些浅部地应力资料分析区域现今应力场特征。根据《中国大陆地壳应力环境基础数据库》(谢富仁等,2007),共和盆地干热岩分布区域内 19 个水压致裂和应力解除法实测地应力钻孔数据,其中钻孔主要分布在青海共和盆地东北部及南部龙羊峡镇、拉西瓦水电站等地,测量深度一般为 50~500

m(王洪等,2021),上述水压致裂和应力解除法实测地应力主应力的方向统计结果(图 2,图 3)显示,共和盆地最大水平主应力优势方向为北东、北东东、北西西向、北北西向,优势方向为北东向。综上所述,青海共和盆地最大水平主应力方向为 NE45°—NE60°,即近北东向。

3.3 初始应力场特点

震源机制是国内外研究地壳动力学问题中应用最为广泛的基础资料(都昌庭,2001),大量的震源机制解的统计结果能克服随机误差从而反映研究地区构造应力场特征(Zoback,2007)。一些学者对共和盆地近 30 年来有详细数据记录的 $M_s \geq 5.0$ 级 13 处地震进行研究,这些震源深度均超过 5 km,其震源机制解可以反映研究场地深部的地应力场,对这 13 处地震进行力学机制分析,根据震源分布(图 4),研究表明,共和盆地深部最大主应力方向为 NE35°—NE65°,整体上具有较好的一致性,呈北东向(都昌庭,2001;雷治红,2020)。

Michael(1987)开发了一种线性应力场反演方案,可通过应用最小二乘法求解。基于 Michael 的

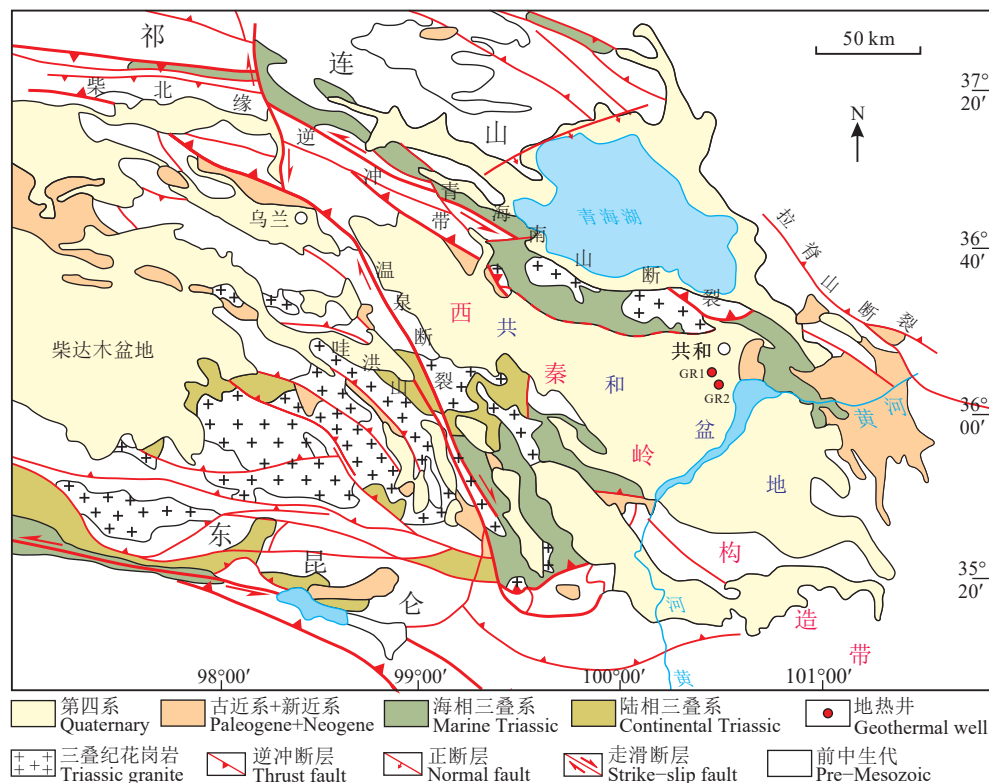


图 1 共和盆地地质构造简图(据王二七等,2009 修改)

Fig.1 Schematic diagram of the geological structure of the Gonghe Basin (modified from Wang Erqi et al., 2009)

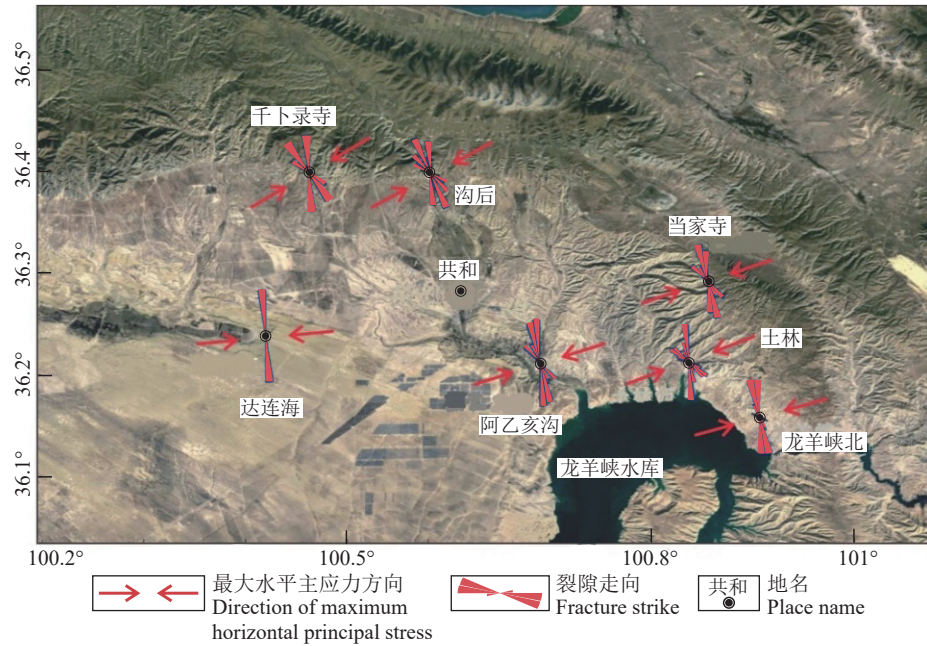


图 2 基于裂隙统计的共和干热岩区地应力方向投影图(据雷治红, 2020 修改)
Fig.2 Direction projection map of in-situ stress in hot and dry rock area of the Gonghe Basin based on fracture statistics (modified from Lei Zhihong, 2020)

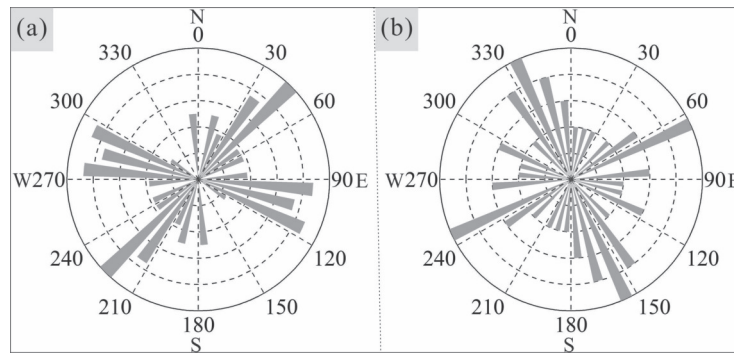


图 3 共和盆地干热岩区最大水平主应力方位(据王洪等, 2021 修改)

a—水压致裂法; b—应力解除法

Fig.3 Orientation of maximum horizontal principal stress in hot dry rock area of the Gonghe Basin (modified from Wang Hong et al., 2021)
a—HF method; b—Stress relief method

方法, Vavry'cuk (2014) 提出了一种新的迭代应力反演技术 (MATLAB 软件包 STRESSINVERSE), 在本研究中, 笔者使用 STRESSINVERSE 软件包对研究区 13 个震源机制解参数 (雷治红, 2020) 进行计算, 反演区域地壳构造应力场, 并绘制震源机制综合解, 结果 (图 4 b) 显示最大主应力方向为 NE41°。通过震源机制解参数反演得到的应力场方向与上述钻孔数据获得的主应力方向具有较好的一致性, 并与都昌庭 (2001) 分析得到的共和盆地东部地区地应力方向接近 NE 向的结论一致, 表明研

究区域主要受 NE 向应力场控制。

4 应力场数值模拟及地应力分布规律

4.1 地应力计算模型

目前, 在典型地应力计算中, 基于理论公式 (1) 采用三向荷载简支模型, 来确定地应力分布 (王勇和杨维好, 2016), 即:

$$\sigma_z = \rho g H, \quad \sigma_x = \lambda_x \sigma_z, \quad \sigma_y = \lambda_y \sigma_z \quad (1)$$

式中, σ_z 为竖直方向地应力, MPa, σ_x 、 σ_y 为水

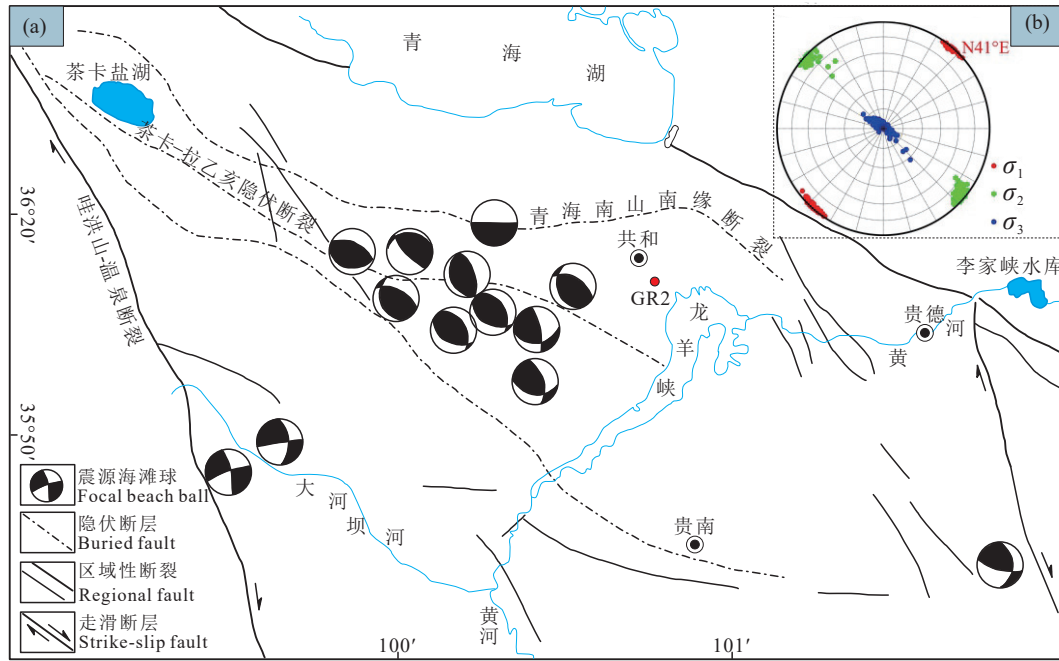


图4 共和盆地地震源分布图(a)(据雷治红, 2020 修改)和震源机制综合解(b)

Fig.4 Seismic source distribution map of the Gonghe Basin (a) (modified from Lei Zhihong, 2020) and the focal mechanism synthesis solution (b)

平方向最小和最大主应力, MPa; ρ 为地层密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为埋深 m ; λ_x 与 λ_y 分别为两个主应力方向的水平侧压力系数。在典型地应力计算模型计算时,常因施加重力、构造应力边界条件时忽略了泊松效应重复影响,导致结果存在较大差异(王丽娟等, 2008)。

本文的弹性本构关系采用公式(2), 与典型模型

不同的是将各地层假设为正交各向异性材料(王勇和杨维好, 2016), 按此模型计算, 采用等效节点反力平衡法消除初始位移, 计算完成后采用相应命令把材料类型调成各向同性, 这样得到的应力、位移场均不发生变化(王勇等, 2016)。采用的边界条件为 Z 方向施加重力加速度, 上顶面施加土覆地层荷载, 但其余面均施加相应法向位移约束。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\mu_{xy}}{E_x} & -\frac{\mu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\mu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{zx}}{E_x} & -\frac{\mu_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 E_x 、 E_y 、 E_z 分别为三个方向弹性模量, MPa; μ_{xy} 、 μ_{yx} 、 μ_{xz} 、 μ_{zx} 、 μ_{yz} 、 μ_{zy} 为各方向泊松比; G_{xy} 、 G_{yz} 、 G_{zx} 为剪切模量, GPa。

在模型中, 由于 X 与 Y 方向施加法向位移约束, 则有 $\varepsilon_x=0$, $\varepsilon_y=0$ 可得 X 、 Y 方向应力表达式为:

$$\sigma_x = \frac{E_x}{E_y} \mu_{xy} \sigma_y + \frac{E_x}{E_z} \mu_{xz} \sigma_z \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{E_x} \mu_{yx} \sigma_x + \frac{E_y}{E_z} \mu_{yz} \sigma_z \quad (4)$$

根据式(1)中 $\varepsilon_x=\lambda_x \sigma_z$, $\varepsilon_y=\lambda_y \sigma_z$ 且取 $E_x=E_y=E_z$, 由上式可得:

$$\lambda_x = \mu_{xy}\lambda_y + \mu_{xz}$$

(5)

$$\lambda_y = \mu_{yx}\lambda_x + \mu_{yz}$$

(6)

由于正交各向异性材料的柔度矩阵具有对称性,故有:

$$\frac{\mu_{xy}}{E_y} = \frac{\mu_{yx}}{E_x}, \frac{\mu_{xz}}{E_z} = \frac{\mu_{zx}}{E_x}, \frac{\mu_{yz}}{E_z} = \frac{\mu_{zy}}{E_y}$$

(7)

因此,各参数需要满足式(5)、(6)即可要得到式(1)中的地应力分布,且避免了泊松效应影响。

上述公式中的剪切模量,可按公式(8)计算:

$$\begin{cases} G_{xy} = \frac{E_x}{2(1+\mu_{xy})} \\ G_{yz} = \frac{E_y}{2(1+\mu_{yz})} \\ G_{xz} = \frac{E_z}{2(1+\mu_{xz})} \end{cases}$$

(8)

4.2 数值模型建立

根据钻孔地层信息建立三维地质模型,共建 9 个地层,因为井场区域范围内地层表面变化不大,所建立的地层均为水平层面,模型大小为长和宽均为 3000 m,深为 4500 m,分析区域足够大,消除了边界效应的影响,提高了结果的可靠性。在三维模型的基础上,对模型进行网格划分,得到三维有限元网格模型如图 5,岩层力学参数如表 2 所示。

4.3 地应力展布规律

通过三维应力场数值模拟,得到了 GR2 井区最小主应力、最大主应力和中间主应力及初始位移分布情况(图 6,图 7),从模拟结果来看,得到的初始位移在 10⁻³ m 以下,足够忽略其影响,500~4000 m 深度范围内三个主应力由浅到深均呈现递增趋势,且应力变化均匀,垂直主压应力(σ_v)介于 10.4~117.4 MPa;水平最大主应力(σ_H)范围为 8.4~93.16 MPa;

水平最小主应力(σ_h)范围为 7.31~81.4 MPa;水平差应力范围为 0~11.5 MPa,三向主应力总体表现为 σ_v>σ_H>σ_h,表明该区域应力结构有利于正断层活动,最大水平主应力梯度为 0.021 MPa/m,最小水平主应力梯度为 0.018 MPa/m,与景锋等(2007)对中国西北区域的水平主应力拟合梯度值 0.021 MPa/m、0.018 MPa/m 的结果一致,与青藏高原地区最大水平主应力梯度 0.016~0.022 MPa 相吻合。共和盆地 GR1 井是距离 GR2 井约 3 km 远的一口干热岩地热井,地层结构与 GR2 井类似,Lei et al.(2019)通过有限元方法模拟了 GR1 井地应力,将本文模拟得到的 GR2 井地应力数据与 GR1 井地应力(Lei et al., 2019)进行对比,3000 m、3500 m、4000 m 三个不同深度的模拟结果(表 3)显示垂直主应力相对误差不到 4%,最小水平主应力相对误差约 7%,而水平最大主应力相对误差约 15%,这也从一定程度上说明本文模拟结果可信用度较好。模拟结果虽然没有直

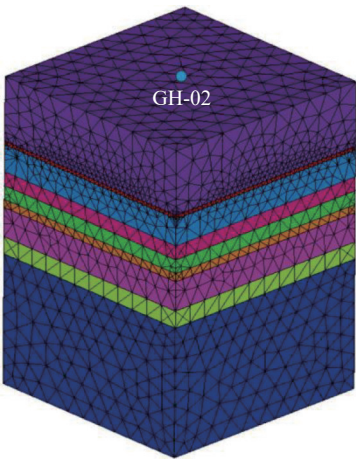


图 5 干热岩研究区三维有限元网格模型
Fig.5 Diagram of the 3D finite element mesh model of the hot dry rock study area

表 2 干热岩 GR2 井岩层类别及岩层力学参数

Table 2 Rock stratum category and rock mechanics parameters of hot dry rock GR2 well								
岩性	深度/m	密度/(kN/m³)	泊松比			弹性模量/GPa		
			μ _x	μ _y	μ _z	G _{xy}	G _{yz}	G _{xz}
泥岩	945	22000	0.238	0.238	0.238	7.51	7.51	7.51
砂岩	1000	23650	0.240	0.240	0.240	14.85	14.85	14.85
二长花岗岩	1395	25770	0.253	0.253	0.253	35.44	35.44	35.44
黑云母花岗岩	1600	25810	0.255	0.255	0.255	42.15	42.15	42.15
花岗闪长岩	1800	26850	0.264	0.264	0.264	43.15	43.15	43.15
二长花岗斑岩	1920	26820	0.258	0.258	0.258	46.56	46.56	46.56
黑云母花岗岩	2350	27560	0.274	0.274	0.274	40.25	40.25	40.25
二长花岗岩	2600	27860	0.269	0.269	0.269	42.36	42.36	42.36
黑云母二长花岗岩	4000	27960	0.271	0.271	0.271	41.28	41.28	41.28

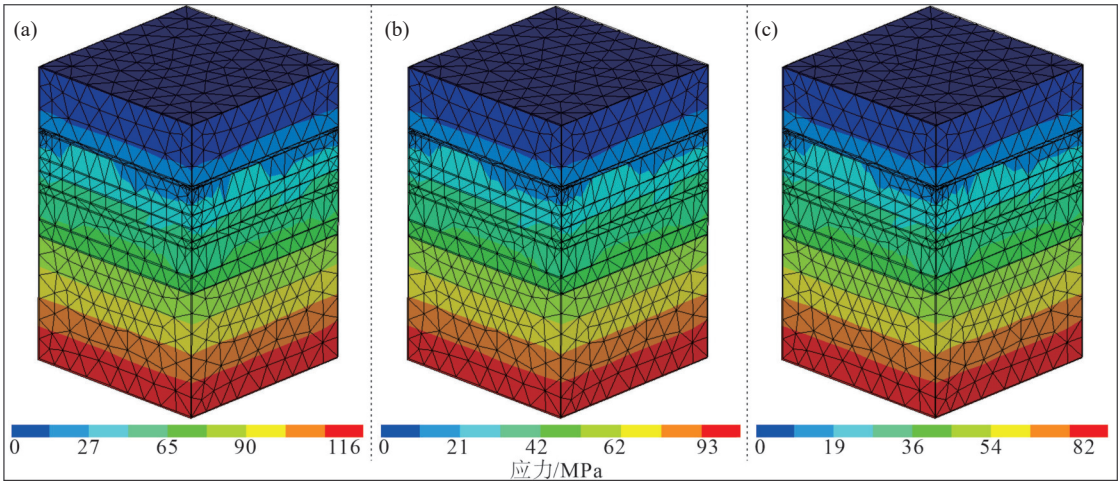


图 6 干热岩研究区三维主应力云图
a—最大主应力云图; b—中间主应力云图; c—最小主应力云图
Fig.6 3D principal stress nephogram of the hot dry rock study area
a–Nephogram of maximum principal stress; b–Nephogram of intermediate principal stress; c– Nephogram of minor principal stress

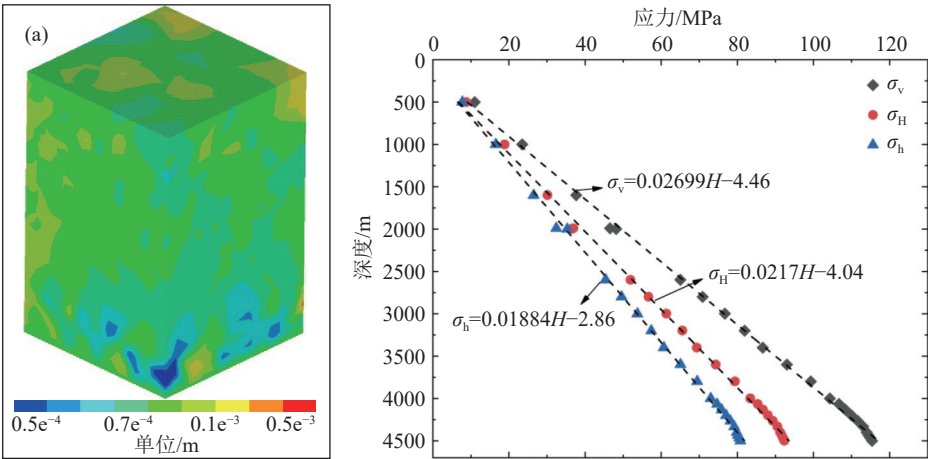


图 7 干热岩 GR2 井位移、地应力模拟结果图
a—Z 向位移云图; b—GR2 井地应力随孔深分布图
Fig.7 Displacement and is-situ stress simulation results diagram in hot dry rock GR2 well
a–Nephogram of Z-direction displacement; b–Variations of stresses with the depth of GR2 well

表 3 干热岩地热井地应力数值模拟值对比							
Table 3 Comparison of stress field numerical simulation values in geothermal wells of dry hot rock							
深度/m	井名	σ_v /MPa	相对误差	σ_H /MPa	相对误差	σ_h /MPa	相对误差
3000	GR2	77	3.75%	61	15%	54	6.8%
	GR1	80		72		58	
3500	GR2	92	3.15%	72	16.2%	63	7.3%
	GR1	95		86		68	
4000	GR2	104	3.7%	83	15.3%	72	5.3%
	GR1	108		98		76	

接揭示最大主应力方向特征,但综上分析认为,GR2 受区域构造应力场控制,最大主应力优势方向可能为 NE 向(NE35°~73°,平均为 NE54°)。

地应力分布主要受构造格架、区域应力场、岩石物理性质多种因素的影响(谭成轩等,2006)。由于研究井场区构造变形较弱,断层不发育,构造格

架对现今地应力的影响并不大,从地应力量值来看,三向主应力为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$, 表明构造垂向应力占主导地位,水平构造作用相对较弱,属于正断层应力环境,野外可见发育不同时期的多处正断层,如阿乙亥沟正断层、龙才峡谷正断层、士林正断层等(雷治红, 2020)。主要影响研究区现今地应力分布的因素为岩性与岩体埋深厚度,岩性对地应力的影响主要体现在岩石的矿物组分、结构及胶结程度等方面(刘建等, 2021)。其中,花岗岩主要为厚层、埋深大、不发育,泥岩、砂岩为埋深小、发育。由于岩性的不同,其杨氏模量、泊松比岩石力学性质也不同,由于花岗岩层埋深较深,力学参数值相对不均一且偏大,从而造成了研究区现今地应力分布的差异。

5 讨 论

5.1 干热岩赋存应力条件浅析

新构造应力场研究表明,新近纪以来,青海共和盆地断裂十分发育,主要分布北西西、北北西、北东向 3 组断裂,北西西向左旋逆冲断层、北北西向右旋高角度逆断层性质最为发育,北东向左旋逆断层分布较少,区域内地应力优势方位与断裂方向近似平行。一些学者认为这种构造组合及其力学性质反映全区受北东向的强大挤压力作用,这是由于共和盆地甚至整个青藏高原均受到来自印度板块北东向水平挤压应力作用,从而导致了高原本体和周边地区产生强烈的构造形变和现代活动构造等(董治平等, 1992; 徐纪人和赵志新, 2006; 孙延贵等, 2007; 王二七等, 2009)。已有研究表明,挤压构造背景下的应力场特征有利于沉积物盖层和花岗岩基底保持高的构造应力存在,进而保证它们具有低

渗透率、低热传导,使对流引起的热损失最小化(刘红战等, 2014; 何大芳等, 2018),从地应力量值来看,4000 m 埋深地应力大小 σ_1 约为 104 MPa、 σ_2 为 83 MPa、 σ_3 为 72 MPa,4500 m 埋深地应力大小 σ_1 约为 117.4 MPa、 σ_2 为 93.16 MPa、 σ_3 为 83.4 MPa,研究区属于高构造压应力状态,符合干热岩赋存的良好条件。

5.2 干热岩注水开发与断层稳定性

研究区作为青藏高原东北缘地震多发地区,受青海南山断裂、西秦岭断裂、共和盆地西部断裂等断层控制,历史上发生过塘格木 7.0 级地震(都昌庭, 2001),研究区距离龙羊峡水库库区大坝约 35 km,干热岩压裂注水开发过程中引起的孔隙压力升高,导致有效应力降低,可能对周边断裂的稳定性产生影响,存在诱发地震的风险。笔者所在的团队曾用库伦破坏准则和拜尔利准则探讨过唐山马头营干热岩开发注水诱发断层稳定性问题(上官拴通等, 2021),但共和盆地干热岩开发过程中注水诱发断层失稳危险性相关研究鲜有报道。

根据库伦破坏准则和拜尔利准则(Byerlee, 1978; Zoback, 2007),当作用于断层面的剪切应力与正应力值之比超过或等于断层的摩擦强度时,断层即达到滑动失稳临界状态。库伦破坏准则可用式(9)表示:

$$\tau = \mu (\sigma_n - P_0) \quad (9)$$

式中, τ 为断层面的剪切应力; σ_n 为作用于断层面的正应力; P_0 为孔隙压力; μ 为根据试验确定的断层面的摩擦系数。根据拜尔利准则,岩石剪切破裂时摩擦系数值介于 $0.6 \leq \mu \leq 1.0$, 通常情况下将 0.6 作为判判断层失稳的临界摩擦系数,库伦准则

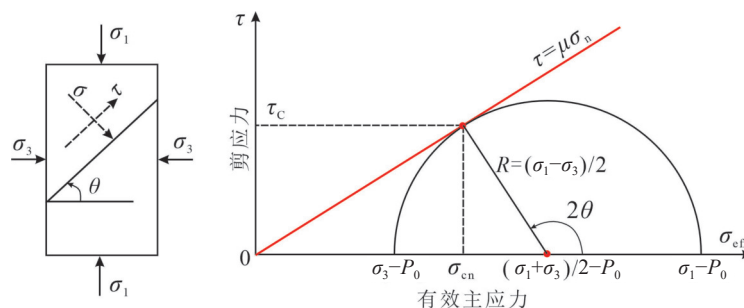


图 8 库伦破坏准则有效应力莫尔圆示意图

Fig.8 Mohrcircle of effective principal stress expressing Coulomb's failure criterion

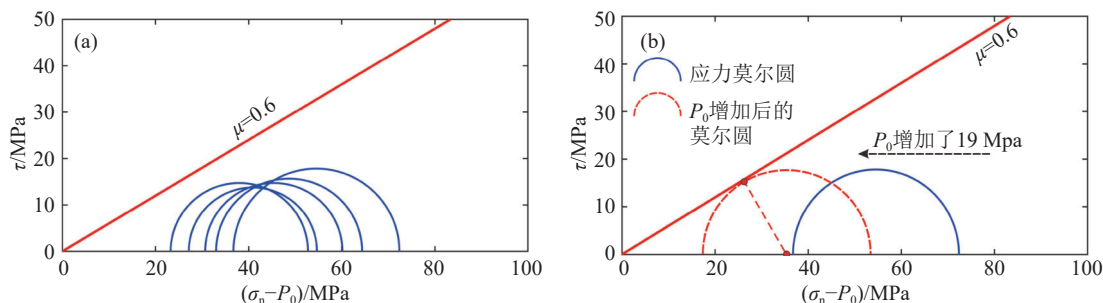


图9 干热岩区断层活动性分析莫尔圆

a—基于地应力的莫尔圆断层活动性分析; b—GR2 井在 4500 m 处断层随孔隙压力的增加可能导致不稳定

Fig.9 Mohr circle of effective principal stress expressing Coulomb's failure criterion in hot dry rock region

a—Mohr circle based on in-situ stress data for activity analysis of faults; b—The faults may lead to instability with the depth of 4500 m of GR2 well with the increase of pore pressure

可用莫尔圆表示, 见图 8(Zoback, 2007; 上官拴通等, 2021; Feng et al., 2022)。

如前所述, 根据干热岩 GR2 井 3000~4500 m 主应力的模拟结果, 绘制主应力莫尔圆, 如图 9 所示, 结果表明测点附近断层总体是稳定的, 任意方位断层面上应力都没有达到断层失稳的临界状态 ($\mu=0.6$)。在后续注水压裂时可能会导致孔隙压力的增加, 有效应力降低, 莫尔圆左移后, 存在断层失稳的可能性。

以研究区 4500 m 干热岩井注水开发为例, 以地力模拟结果作为初始条件, 讨论了注水过程中孔隙压力的升高, 对干热岩开发利用区内断层稳定性的影响。干热岩注水开发中随着注入量的增加, 储层内的孔隙压力不断升高, 导致应力莫尔圆左移 (图 9), 分析表明现今应力环境下, 孔隙压力升高约 19.9 MPa, 左移的莫尔圆将与强度包络线相切, 场区内的断层将达到滑动失稳的临界状态, 综上, 在统一的区域地应力场作用下, 研究区 3000~4500 m 干热岩注水开发过程中, 当地面持续注入压力达到或超过约 19.9 MPa 时, 可能引起场区内断层的活化, 导致中小地震的发生, 在干热岩开发利用中需注意防范。同时, 干热岩注水开发中井筒附近的热应力不容忽视, 冷热水交替将导致井筒附近有效应力增加, 此外注水压力、储层渗流性、储层温度变化及水化作用等都会对断层活化产生不同程度的影响 (Feng et al., 2022), 研究区目前还未大规模开发干热岩地热能, 对深地热井试采参数掌握程度有限, 本文暂不讨论注水压力、注水温度变化及注水引起的应力腐蚀效应等对注水诱发断层失稳危险性的

影响, 笔者在后续的工作中将作为重点方向研究。

6 结 论

本文基于地质构造演化、震源机制解、节理裂隙统计、原地应力实测数据简要分析了共和盆地区域应力场特征, 利用正交各向异性弹性本构模型, 通过数值模拟获取了共和盆地 GR2 井的三维地应力数据, 依据莫尔库伦破裂准则并结合拜尔利定律, 对附近断裂的活动性及注水影响进行了简要分析和讨论。研究结果对于共和盆地构造应力场研究及干热岩的开发利用具有一定参考价值。

(1) 模拟所得地应力分布与理论值吻合, 消除得到的初始位移在 10^{-3} m 以下, 满足精度要求, 最终预估了井中地应力场分布特征。共和盆地 GR2 井 500~4500 m 深度地层水平最小主应力介于 7.31~81.4 MPa, 水平最大主应力介于 8.4~93.16 MPa, 垂直主压应力介于 10.4~117.4 MPa。

(2) 在 500~4500 m 深度范围内, 三向主应力总体表现为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$, 表明构造垂向应力占主导地位, 水平构造作用相对较弱, 该区域应力结构有利于正断层活动。

(3) 青海共和盆地最大水平主应力方向为 NE35°~73°, 整体上呈 NE 向, 最大主应变以印度洋板块向欧亚大陆的俯冲碰撞挤压变形作用为主, 有利于花岗岩岩体具有低的流体渗透率、低的热流传导。

(4) 干热岩注水开发与断层稳定性分析表明, 在统一的区域地应力场作用下, 研究区 3900~4500 m 干热岩注水开发过程中, 当地面持续注入压力达到或超过约 19.9 MPa 时, 可能引起场区内断层的滑

动失稳, 导致中小地震的发生, 在干热岩开发利用中需注意防范。

致谢: 本文研究工作得到青海共和盆地干热岩项目组及匿名审稿专家提出的宝贵意见, 在此一并表示感谢!

References

- Amadei B, Stephansson O. 1997. Rock Stress and Its Measurement[M]. Centek Publishers.
- Byerlee J. 1978. Friction of rocks[J]. *Pure & Applied Geophysics*, 116(4/5): 615–626.
- Ding Sanping. 2008. Early Palaeozoic Tectonic Framework and Evolution in the Junction of Western Qinling Orogenic Belt and Qilian Orogenic Belt[D]. Xi'an: Chang'an University, 1–200(in Chinese with English abstract).
- Dong Zhiping, Yao Zhengsheng, Lei Fang. 1992. Active faults and modern tectonic stress field in the region of eastern Qinghai[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 12(4): 64–71 (in Chinese with English abstract).
- Du Changting. 2001. Characteristics of the mechanism solutions of Gonghe earthquakes[J]. *Plateau Earthquake Research*, 13(4): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Feng C J, Gao G L, Zhang S H, Sun D S, Zhu S Y, Tan C X, Ma X D. 2022. Fault slip potential induced by fluid injection in the Matouying enhanced geothermal system (EGS) field, Tangshan seismic region, North China[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(7): 2257–2287.
- He Dafang, Zeng Lin, Yang Hanyuan, Ye Jianling, Cao Hui, Zhang Dali. 2018. Granite mass hot dry rock resources hosting condition in hunan[J]. *Coal Geology of China*, 30(2): 50–57,67 (in Chinese with English abstract).
- He Jiangda, Xie Hongqiang, Wang Qizhi, Xiao mingli. 2009. Inversion analysis of initial geostress in dam site of Guandi Hydropower Project[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 31(2): 166–171 (in Chinese with English abstract).
- He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, Jiang Yaodong. 2005. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(16): 2804–2813 (in Chinese with English abstract).
- Jing Feng, Sheng Qian, Zhang Yonghui, Luo Wenchao, Liu Yuankun. 2007. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(10): 2056–2062 (in Chinese with English abstract).
- Lee K K, Ellsworth W L, Giardini D, Townend J, Ge S, Toshihiko S, Yeo I, Kang T S, Junkee R, Sheen D H, Chang C D, Woo J U, Langenbruch C. 2019. Managing injection-induced seismic risks[J]. *Science*, 364: 730–732.
- Lei Zhihong. 2020. Study on the Characteristics of Hot Dry Rock Reservoir and Fracturing Test Model in the Gonghe Basin, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University, 1–178 (in Chinese with English abstract).
- Lei Z H, Zhang Y J, Yu Z W, Hu Z J, Li L Z, Zhang S Q, Fu L, Zhou L, Xie Y Y. 2019. Exploratory research into the enhanced geothermal system power generation project: The Qiabuqia geothermal field, Northwest China[J]. *Renewable Energy*, 139: 52–70.
- Li Liangzhen, Zhang Yanjun, Lei Zhihong, Zhang Qian, Zhang Senqi, Fu Lei. 2019. Inversion analysis of 3D geostress field in GR2 well area of Gonghe hot rock geothermal well[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 40(1): 115–123 (in Chinese with English abstract).
- Liu Aihua, Yang Qing, Wu Junping. 2013. A practical ANSYS 3-D numerical simulation method for in-situ stress field[J]. *Journal of Geomechanics*, 19(2): 133–142 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jian, Hui Chen, Fan Jianming, Lü Wenya, Wang Jiwei, Yin Chen, Wang Haonan. 2021. Distribution characteristics of the present-day in-situ stress in the Chang 6 tight sandstone reservoirs of the Yanchang Formation in the Heshui Area, Ordos Basin, China and suggestions for development[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(1): 31–39 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongzhan, Zhang Xiaoling, Yao Mingbo. 2014. Geothermal geology characteristic and origin analysis of Shilin Basin in Yunnan Province[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, (1): 69–74 (in Chinese with English abstract).
- Lu Chuan, Wang Guiling. 2015. Current status and prospect of hot dry rock research[J]. *Science & Technology Review*, 33(19): 13–21 (in Chinese with English abstract).
- Michael A J. 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92: 357–368.
- Ren Haidong, Wang Tao. 2017. Temporal-spatial variations, sources and tectonic significances of the Triassic granitic rocks in the Junction part of the east Kunlun and west Qinling Orogen, Central China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(S1): 59–63 (in Chinese with English abstract).
- Shangguan Shuantong, Sun Dongsheng, Zhang Guobin, Yang Yuehui, Qi Xiaofei, Chen Dongfang, Qiao Yongchao, Li A Wei, Chen Qunce. 2021. In-situ stress measurement and fault stability analysis within a depth of 3–4 km in the Tangshan area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(12): 3915–3925 (in Chinese with English abstract).
- Sun Dongsheng. 2014. Experimental Study of Anelastic Strain Recovery in-Situ Stress Measurement Methods and its Application[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1–134(in Chinese with English abstract).
- Sun Yangui, Fang Hongbin, Zhang Kun, Zhao Fuyue, Liu Shiyang, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2007. Step-like landform system of the Gonghe basin and the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and development of the Yellow River[J]. *Geology in China*, 34(6): 1141–1147 (in Chinese with English abstract).

- Tan Chengxuan, Sun Weifeng, Sun Ye, Wang Lianjie. 2006. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1627–1632 (in Chinese with English abstract).
- Vavryčuk V. 2014. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms[J]. *Geophysical Journal International*, 199: 69–77.
- Wang Chenghu. 2014. Brief review and outlook of main estimate and measurement methods for in-situ stresses in rock mass[J]. *Geological Review*, 60(5): 971–991, 992–995, 996 (in Chinese with English abstract).
- Wang Erqi, Su Zhe, Xu Guang. 2009. A case study on lateral extrusion occurred along some orogenic belts in China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 44(4): 1266–1288 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guilin, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(6): 1074–1085 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hong, Wang Chenghu, Gao Guiyun, Chen Nian, Zhou Hao, An Yifei. 2021. The state of the in-situ stress and fault slide evaluation of Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 16(1): 123–133 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinan, Li Fei. 2015. Review of inverse optimal algorithm of in-situ stress field and new achievement[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 44(2): 189–205 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science & Technology Review*, 30(32): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lijuan, Mu Qingsong, Miao Tiande. 2008. Numerical simulation of 3D initial stress field of Jinchuan No. 2 Mining Area[J]. *Metal Mine*, (11): 100–102 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yong, Yang Weihao. 2016. Numerical simulation method for 3D initial geostress field based on ANSYS[J]. *Coal Engineering*, 48(10): 77–88 (in Chinese with English abstract).
- Xie Furen, Chen Qunce, Cui Xiaofeng, Li Hong, Yang Shuxin, Guo Qiliang, Chen Lianwang, Xu Zhonghuai, Zhang Yanshan, Dou Shuqin, Zhao Jiantao, Zhang Zhoushu, Liu Changyi, Wang Gangjun. 2004. Fundamental database of crustal stress environment in continental China[J]. *Progress in Geophysics*, 22(1): 131–136 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jiren, Zhao Zhixin. 2006. Characteristics of the regional stress field and tectonic movement on the Qinghai–Tibet Plateau and in its surrounding areas[J]. *Geology in China*, 33(2): 275–285 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tianfu, Hu Zixu, Li Shengtao, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Li Fengyu, 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).
- Yu Zhixiong, Zhou Chuangbin, Chen Yifeng, Li Junping. 2007. Study on v–SVR and modified GA in back analysis of initial stress fields from displacements[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 28(1): 151–156, 162 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chongyuan, Wu Manlu, Chen Qunce, Liao Chunting, Feng Chengjun. 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 E Y, Wen D G, Wang G L, Yan W D, Wang W S, Ye C M, Li X F, Wang H, Tang X C, Weng W, Li K, Zhang C Y, Liang M X, Luo H B, Hu H Y, Zhang W, Zhang S Q, Jin X P, Wu H D, Zhang L Y, Feng Q D, Xie J Y, Wang D, He Y C, Wang Y W, Chen Z B, Cheng Z P, Luo W F, Yang Y, Zhang H, Zha E L, Gong Y, Zheng Y, Jiang C S, Zhang S S, Niu X, Zhang H, Hu L S, Zhu G L, Xu W H, Niu Z X, Yang L. 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.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Yao Anping. 2004. Western Qinling–Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23–32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongming, Pei Xianzhi, Li Zuochen, Li Ruibao, Liu Chengjun, Pei Lei, Chen Youxin, Chen Guochao, Wang Meng. 2017. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating, geochemistry and its geological significance of the heimahe granitic pluton in the western segment of the Qinghai'nanshan tectonic belt[J]. *Geological Review*, 63(4): 1079–1101 (in Chinese with English abstract).
- Zoback M D. 2007. *Reservoir Geomechanics*[M]. Cambridge University Press.

附中文参考文献

- 丁仁平. 2008. 西秦岭—祁连山带(东段)交接部位早古生代构造格架及构造演化[D]. 西安: 长安大学, 1–200.
- 董治平, 姚政生, 雷芳. 1992. 青海东部活断层与现代构造应力场[J]. *地壳形变与地震*, 12(4): 64–71.
- 都昌庭. 2001. 共和地震震源机制解特征[J]. *高原地震*, 13(4): 1–5.
- 何大芳, 曾琳, 杨汉元, 叶见玲, 曹晖, 张大礼. 2018. 湖南花岗岩体干热岩资源赋存条件分析[J]. *中国煤炭地质*, 30(2): 50–57, 67.
- 何江达, 谢红强, 王启智, 肖明砾. 2009. 官地水电站坝址区初始地应力场反演分析[J]. *岩土工程学报*, 31(2): 166–171.
- 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 姜耀东. 2005. 深部开采岩体力学研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 24(16): 2804–2813.
- 景锋, 盛谦, 张勇慧, 罗超文, 刘元坤. 2007. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 26(10): 2056–2062.

- 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, 1-178.
- 李良振, 张延军, 雷治红, 张谦, 张森琦, 付雷. 2019. 共和干热岩地热井 GR2 井区三维地应力场反演分析[J]. 力学季刊, 40(1): 115-123.
- 刘爱华, 杨清, 吴均平. 2013. ANSYS 三维地应力场数值模拟方法应用研究[J]. 地质力学学报, 19(2): 133-142.
- 刘建, 惠晨, 樊建明, 吕文雅, 王继伟, 尹陈, 王浩南. 2021. 鄂尔多斯盆地合水地区长 6 致密砂岩储层现今地应力分布特征及其开发建议[J]. 地质力学学报, 27(1): 31-39.
- 刘红战, 张小凌, 姚明波. 2014. 云南石林盆地地热地质特征及成因分析[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), (1): 69-74.
- 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.
- 任海东, 王涛. 2017. 东昆仑—西秦岭造山带对接处三叠纪花岗岩岩石时空演化、物源特征对比及其大地构造意义[J]. 地球学报, 38(S1): 59-63.
- 上官拴通, 孙东生, 张国斌, 杨跃辉, 齐晓飞, 陈东方, 乔永超, 李阿伟, 陈群策. 2021. 唐山地区 3~4 km 深部地应力测量及断层稳定性分析[J]. 地质学报, 95(12): 3915-3925.
- 孙东生. 2014. 非弹性应变恢复原地应力测量方法的实验研究及应用[D]. 北京: 中国地质科学院, 1-134.
- 孙延贵, 方洪宾, 张琨, 赵福岳, 刘世英. 2007. 共和盆地层状地貌系统与青藏高原隆升及黄河发育[J]. 中国地质, 34(6): 1141-1147.
- 谭成轩, 孙炜锋, 孙叶, 王连捷. 2006. 地应力测量及其地下工程应用的思考[J]. 地质学报, 80(10): 1627-1632.
- 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): 971-991, 992-995, 996.
- 王二七, 苏哲, 许光. 2009. 我国的一些造山带的侧向挤出构造[J]. 地质科学, 44(4): 1266-1288.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. 中国地质, 44(6): 1074-1085.
- 王洪, 王成虎, 高桂云, 陈念, 周昊, 安易飞. 2021. 青海共和盆地地应力状态与断层稳定性分析[J]. 震灾防御技术, 16(1): 123-133.
- 王金安, 李飞. 2015. 复杂地应力场反演优化算法及研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 44(2): 189-205.
- 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱传庆, 饶松, 唐晓音, 孔彦龙, 罗璐, 李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 30(32): 25-31.
- 王丽娟, 慕青松, 苗天德. 2008. 金川二矿区 3D 初始应力场的数值模拟[J]. 金属矿山, (11): 100-102.
- 王勇, 杨维好. 2016. 基于 ANSYS 的三维初始地应力场模拟方法[J]. 煤炭工程, 48(10): 77-88.
- 谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 李宏, 杨树新, 郭启良, 陈连旺, 许忠淮, 张彦山, 窦淑芹, 赵建涛, 张周术, 刘长义, 王刚军. 2007. 中国大陆地壳应力环境基础数据库[J]. 地球物理学进展, 22(1): 131-136.
- 徐纪人, 赵志新. 2006. 青藏高原及其周围地区区域应力场与构造运动特征[J]. 中国地质, 33(2): 275-285.
- 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.
- 余志雄, 周创兵, 陈益峰, 李俊平. 2007. 基于 v-SVR 和 GA 的初始地应力场位移反分析方法研究[J]. 岩土力学, 28(1): 151-156, 162.
- 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.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 11(3): 23-32.
- 张永明, 裴先治, 李佐臣, 李瑞保, 刘成军, 裴磊, 陈有炘, 陈国超, 王盟. 2017. 青海南山构造带西段黑马河花岗杂岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 63(4): 1079-1101.