深部开采理论与关键技术

深部高温高压岩体剪切力学特性研究进展

芮旭升1.2,杨青帅1.2,周传洪1.2,张世雄1.2,张洪伟1.2,宋嘉珺1,吴文凌1

1. 中国矿业大学(北京)煤矿灾害预防与处置应急管理部重点实验室,北京100083;

2. 厚煤层绿色智能开采教育部工程研究中心,北京100083

中图分类号:TD313 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2025)02-0001-13 DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2025.02.001

摘要 深部干热岩地热资源是地热领域发电的清洁可再生主导资源,是一种高温高压、低孔低渗等特性,需要通过热储水压致 裂技术进行增渗开采。水压致裂建储过程中,低压注水诱导裂隙网络或原生裂隙发生剪切滑移,促使裂隙在其粗糙面下实现 错动支撑是热储增透的主要技术手段之一,其理论基础主要为高温高压岩体剪切力学特性。为阐明高温高压岩体剪切力学行 为研究进展,总结了高温高压岩体剪切理论模型研究现状,评述了高温高压岩体剪切物理力学特性和变形破坏规律,讨论了热 应力及热冲击效应对岩石微观结构的影响机制,提出了目前高温高压岩体剪切力学特性研究存在的不足,展望了未来对于高 温高压岩体剪切物理力学参数温度效应的研究方向,以期国内同行对其有全面的了解和认识。

关键词 增强型地热系统;干热岩;剪切试验方法;物理力学特性;变形特征

深部干热岩地热资源是一种清洁可再生、发电无 干扰、稳定可持续的战略性接替能源,其规模化开发 对于保障我国能源安全、实现"双碳"目标具有重大 意义^{III}。干热岩(Hot Dry Rock, HDR)是指埋藏于地球 深部,岩体内部不存在或仅存在少量流体、温度高于 180 ℃ 的高温岩体^[2], 埋深一般大于 3 km, 最高温度可 达350℃以上。我国陆域3~10km埋深范围内的干 热岩地热资源储量可折合856万亿t标准煤,可采储 量占全球的1/6^[-s]。干热岩岩性一般为致密花岗岩,具 有低孔隙度、低渗透率等典型特征,并且赋存于深部 高温高压极端环境中®。因此,要获取干热岩中储存 的热量,必须通过水压致裂技术对致密储层进行改造, 形成复杂的、规模巨大的渗流通道或裂隙网络,然后 进行人工注水循环换热开采[79]。在国内外很多干热 岩开发示范工程中发现,水力压裂改造仅是储层渗透 性增强的一种方式,进一步增渗的方法可以通过人工 注水触发裂隙网络剪切滑动,并在裂隙面的错动支撑 效应下进一步增强缝网的导流能力,这一现象被称为 "水力剪切增透"[10-11]。如图1所示,由于深部地热储 层温度普遍在150℃以上,埋深大,地应力更高,导致 高温、高地应力成为研究深部地热岩体水力诱导剪切 增渗机制的难点。随着干热岩地热资源开发进程加

快,水力剪切增透机制得到了众多科学研究者关注, 而高温高压岩体剪切演化规律、剪切物理力学参数的 温度效应尚不明确,导致无法进一步描述诱导裂隙剪 切的水力学机理和增渗机制。因此,高温高压岩体剪 切物理力学特性的基础理论还需进一步阐明。

目前,针对高温高压岩体剪切特性的研究主要采 用的是理论建模和剪切实验研究方法[12-14]。在理论模 型方面,常规的剪切力学理论已经非常成熟,但是考 虑到干热岩赋存于高温高压环境中,原本浅部或常温 下适用的剪切力学理论已经无法满足深部高温高地 应力场景。探索能够考虑高温高压影响的岩体剪切 力学本构模型十分重要。相关研究提出了基于 Barton 理论考虑温度与粗糙裂隙面摩擦系数的剪切本构模 型¹⁰、基于 Hoek-Brown 强度准则的高温剪切屈服函 数¹⁵、基于 Weibull 分布的高温损伤剪切岩石本构方 程等16%。在室内实验上,研究者旨在通过建造能够同 时施加高温与高压环境的试验机,开展深部干热岩力 学特性实验,探索高温高压耦合环境下岩体力学参数 的演变过程¹⁷⁷,例如开发了"600 ℃ 20 MN 伺服控制 的高温高压岩体三轴试验机"等18。随着实验技术的 进步,目前,已经有很多试验机能实现高温高压同步 加载,并实现了 Φ200 mm×400 mm 或 300 mm×300 mm×

收稿日期:2024-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52204162);北京市自然科学基金面上项目(3232026);中央高校基本业务费(2023YQTD02)

作者简介: 芮旭升(2000—), 男, 硕士, 主要从事高温岩体力学与地热开发研究, E-mail: rxsping@163.com。

通信作者: 张洪伟(1990—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事矿山压力与岩层控制、高温岩体力学与地热开发等方面的教学与科研工作, E-mail: hongwei@cumtb.edu.cn。



图 1 深部干热岩开发示范工程 (a)、水力压裂 (b)、水力剪切 (c) 示意图

Fig. 1 Deep hot dry rock development demonstration(a), hydraulic fracturing (b), hydraulic shear (c) diagram

300 mm 大尺度试样的高温高压测试环境^[18-19]。在高温高压岩体损伤的微观表征方面,研究人员采用工业CT、SEM 扫描电镜、核磁共振仪等,揭示了岩体热力损伤机制^[20-22]。

为较全面综述现有高温高压岩体剪切力学理论 及实验研究现状,本文介绍了高温高压岩体剪切力学 模型的研究进展,总结了高温高压岩体剪切实验的主 要方法,评述了高温高压岩体剪切物理力学参数的温 度效应及剪切变形破坏特征,系统介绍了热应力及热 冲击效应对岩体微观结构的影响机制,以期为相关研 究提供一定的基础和借鉴。

1 深部干热岩地热资源开发现状

地热资源通常被视为矿产资源的一种,同时也具 有地下水资源特性。地热资源有很多分类方式,按储 层温度可分为低温(<90℃)、中温(90~150℃)和高温 (>150℃)地热资源;按储层介质属性可分为孔隙型、 裂隙型、喀斯特裂缝型和混合型地热资源;按热量传 输方式可分为对流型、传导型地热资源;按热源属性 可分为火山岩浆型、非岩浆型地热资源;按照板块构 造位置可分为板缘型、板内型地热资源;按盘山构造 背景可分为隆起山地(造山带)型和沉积盆地型地热 资源;按照地质构造环境可分为现(近)代火山型、岩 浆型、断裂型、断陷、凹陷盆地型地热资源^[23];按照赋 存深度可分为浅层(<200 m)、中深层(200 m~3 km)和 深层(3~10 km)地热资源^[24]。其中,干热岩地热资源兼 具高温和深层两种赋存属性,其资源储量远远大于常 规水热型地热资源,是地热领域用于发电的主导资源^[59]。

国际上针对干热岩的研究与开发始于 20 世纪 70 年代,美国率先在新墨西哥州的 Fenton Hill 进行了 干热岩试采,随后英国、德国、法国、日本、澳大利亚、 韩国等国家也开展了相关试采工作^[26-28]。当前,国内外 已开展了 60 多个示范工程,但尚未商业化运行,很多 项目因高温高压岩体力学复杂环境、注水诱发微地震 等问题被迫终止。我国干热岩储量巨大,但资源的勘查与开发工作起步较晚,近年来已在青海共和、福建 漳州、广东惠州、河北唐山马头营、山西大同、江苏兴 化等地区开展了干热岩勘查开发探索,并取得了一些 阶段性成果^[2431]。

2 高温高压岩体剪切力学模型

2.1 常规岩体剪切力学模型

岩体由岩块和结构面共同组成,结构面力学强度 远低于岩块的力学强度,并控制着岩体剪切运动行为。 岩体发生剪切滑动需要所受的剪应力超过其峰值剪 切强度。刻画剪切行为最基本的模型是剪切本构模 型或称为剪应力-应变关系。自1776年库伦剪切破 坏准则提出以来,国际上发展出很多剪切破坏理论, 但大多数是建立在常温条件下的。1973年 Barton^[2] 提出了 JRC-JCS 剪切强度理论,该理论考虑了结构面 粗糙形貌对剪切行为的影响,并采用节理面粗糙度系 数(JRC)指标,对结构面形貌进行了统计学意义上的 定量描述。国内外学者围绕岩体剪切力学模型展开 了大量研究,取得了丰富的研究成果,如表1所示。 Goodman^[3] 基于直接剪切实验结果,认为节理的大部 分非线性变形为节理面微凸体的非线性压碎与张裂, 并提出三段式线性本构模型来表征节理面在不同法 向应力下的剪切行为; Saeb 与 Amadei[™] 采用分段线性 函数来描绘节理剪切应力-位移全过程,将 Goodman 模型推广至线性的形式; Simon¹³⁵ 总结了 20 世纪 90 年 代以来岩石结构面非线性本构模型的发展,并提出了 一种指数型的非线性本构模型; 唐志成等[3-37] 通过分 段函数分析剪切过程中的剪胀现象,发展了非线性归 一化位移软化本构模型,适用于描述含不同起伏角非 贯通节理的直剪行为; Park¹⁸⁸ 建立了以节理粗糙度演 化特征为基础的剪切本构模型,该模型定义了峰值摩 擦系数的标准,可用于预测恒定法向载荷(CNS)及恒 定法向刚度(CNL)条件下裂隙岩体的剪切行为;肖卫

国¹⁹⁹提出节理在法向和切向载荷控制下弹塑性强化 模型和剪胀软化模型,补充了微凸体剪切破坏过程中 的强化夹层现象,并利用随动强化模型来描述这种强 化行为,该模型可以较合理地模拟节理剪切过程中的 实际行为;赵延林¹⁰⁰揭示了节理微凸体的细观爬坡和 宏观剪胀,提出了在节理粗糙度和法向应力影响下的 非线性剪胀模型,该模型可以较好地分析岩石节理对 剪切力学特性的影响。

表1 部分剪切力学模型

 Table 1
 Shear constitutive model of high temperature rock mass

剪切本构模型表达式	研究者
$\tau = u \left(\frac{\tau_{p} - \tau_{r}}{u_{p} - u_{r}} \right) + \frac{\tau_{r} u_{p} - \tau_{p} u_{r}}{u_{p} - u_{r}}$ $\left(u_{p} \leqslant u \leqslant u_{r} \right)$	Goodman ^[33]
$\left\{\begin{array}{c} \mathrm{d}\sigma_{\mathrm{n}}\\ \mathrm{d}\tau\end{array}\right\} = \left[\begin{array}{c} k_{\mathrm{nn}}k_{\mathrm{nt}}\\ k_{\mathrm{tn}}k_{\mathrm{tt}}\end{array}\right] \left\{\begin{array}{c} \mathrm{d}\nu\\ \mathrm{d}u\end{array}\right\}$	Saeb与 Amadei ^[34]
$\tau_{\rm p} = c + \sigma_{\rm n} \tan \Phi$	Simon ^[35]
$\tau = \tau_{\rm r} (j_1 \delta - 1) \mathrm{e}^{-j_2 \delta^{N j_3}} + \tau_{\rm r}$	唐志成等136
$\tau_{\rm p} = \tan \left[JRC \lg \left(JCS / \sigma_{\rm n} \right) + \Phi_{\rm b} \right]$	Barton ^{等[32]}
$\tau_{\rm p} = \frac{\sigma_{\rm n} (1 - a_{\rm s}) \left(\dot{V} + \tan \Phi_{\rm b} \right) + a_{\rm s} \tau_{\rm intact}}{1 - (1 - a_{\rm s}) \dot{V}}$	Ladanyi和 Archambault ⁽⁴⁴⁾
$\tau_{\rm p} = \sigma_{\rm n} (1 - a_{\rm s}) \tan \left(\Phi_{\rm i} + \Phi_{\rm b} \right) + a_{\rm s} s_{\rm r}$	Saeb ^[34]
$\tau = \tau_r + (d - \tau_r) \exp\left(-\frac{5u}{u_r}\right) - d \exp(-m_u)$	Simon ^[35]
$\begin{split} \tau &= k_{\mu} \delta \sigma_{n} ; \ \delta \leq \delta_{p} \\ \tau &= \left[\left(\mu_{p} - \mu_{r} \right) e^{-C_{f} \left(\delta_{r} - \delta_{p} \right)} + \mu_{r} \right] \sigma_{n} ; \ \delta > \delta_{p} \end{split}$	Park等 ^[18]
$\tau = j_4 \left(\mu - \mu_0\right) / \left[1 + C(\mu - \mu_0)^{k_{\rm f}}\right]$	肖卫国等
$u_{n} = \alpha_{1}\delta^{2} + \alpha_{2}\delta + \alpha_{3}$ $u_{n} = \alpha_{4}\ln\delta + \alpha_{5}$	唐志成等18
$u_{n} = \beta_{1} - \beta_{2} \exp(-\beta_{3}\delta)$ $u_{n} = \delta \left(1 - \frac{\sigma_{n}}{\sigma_{T}}\right)^{1.5} \tan \Phi_{i0} + \frac{\sigma_{n}u_{m}}{k_{ni}u_{m} - \sigma_{n}}$	Simon ^[15]
$u_{n} = 0, \delta < \delta_{p}$ $u_{n} = \ln \left[0.5 \left(\delta - \delta_{p} \right) + 1 \right]^{C_{d}}, \delta > \delta_{p}$	Park 李 ^[38]
$u_{\rm n} = \eta (\delta - 0.5u_1)^2 + u_{\rm p}$	赵延林等

2.2 高温岩体剪切力学模型

常温下的剪切本构模型已经得到了很好的发展, 理论基础很成熟,但高温下的剪切本构模型发展缓慢。 高温岩体物理力学性质差异较大,加之岩体的高度非 均质性,难以提出普遍适用的高温岩体剪切力学模型。 一般情况下,随温度升高,组成岩体的各类矿物发生 差异性热膨胀,产生热破裂,岩体强度也随之改变^[40-41]。 特别是当温度高达一定程度后,岩体内部一些有机质 开始热解、矿物发生相态变化(如花岗岩中α石英在 573℃转变为β石英,晶体结构重新排列,显著降低了 岩体力学性能^[42-43]),这些因素都增加了高温岩体剪切 力学模型研究的难度。

由于温度对节理面摩擦强度的影响,改变了裂隙

面剪切特性,高温岩体剪切力学模型如表2所示。张 洪伟¹⁰根据温度与粗糙裂隙面摩擦系数之间的关系, 推导出了高温高压下考虑温度效应的岩体峰值剪切 强度表达式:郭沛¹⁵¹参照 Hoek-Brown 强度准则的非 线性特征,推导出基于该强度准则的剪切硬化参量, 以表征剪切过程中的岩体屈服面状态,同时推导出与 温度相关的材料参数 m。,构建了考虑温度影响的双屈 服弹塑性剪切本构模型;黄晓辉16根据岩体微单元剪 切强度的 Weibull 分布, 推导出其剪切强度密度分布 函数,同时利用岩石剪切变形下发生破坏微单元的数 量,计算得到了剪切损伤本构方程,又选用剪切模量 作为热损伤变量来表征温度产生的热损伤,最后建立 了温度冲击劣化和岩石微单元体损伤下,高温岩体剪 切本构方程;为了解释加热速率对峰值剪切强度的影 响, 唐志成189 考虑了不同法向载荷对高温岩体热效应 的影响,建立了与温度相关的裂隙岩体剪切强度准则; 可用于评估高温裂隙岩体峰值剪切强度; Kumari⁴⁶基 于非线性摩尔库伦剪切失效准则,根据实验结果分别 拟合得到了内摩擦角、黏聚力及临界围压温度效应的 表达式,建立了适用于高温高围压下的剪切本构方程。

可以看出,可用于表征高温岩体剪切本构关系的 模型相对较少,通过实验等方法探寻高温剪切行为, 构建高温剪切力学模型十分迫切。

3 高温岩体剪切实验方法

3.1 试样的选择及高温处理方法

高温岩体地热开发与利用、高放核废料地下深层 处理、矿山岩体深部开采、超深钻探井井壁围岩稳定

表 2 高温岩体剪切本构模型

 Table 2
 Shear constitutive model of high temperature rock mass

高温剪切本构模型表达式	研究者
$f_{(u)} = \tan\left[JRClg\left(\omega\sigma_{c(T)}/\sigma_{n}\right) + \Phi_{b(T)}\right]$ $\tau_{(T)p} = (\sigma_{n} - p_{0})\tan\left[JRClg\left(\frac{\omega\sigma_{c(T)}}{\sigma_{n} - p}\right) + \Phi_{b}\right]$	张洪伟™
$f_q(p,q,h_q) = q - \frac{-m_q h_q + \sqrt{m_q^2 h_q^2 + 36m_q h_q p + 36h_q^2}}{m_q = 13.3518 \times \ln(1.2601 \times \ln T)} = 0$	郭沛[15]
$\begin{aligned} \tau &= \eta \log_n \left[\frac{(n-1)\gamma}{\gamma_{\rm e}} + 1 \right] G_0 \gamma \cdot \exp\left[- \left(\frac{1}{\gamma_{\rm p}} \cdot \frac{\gamma}{\alpha} \right)^m \right] \\ D_{\rm T} &= 1 - \frac{G_{\rm T}}{G_0} \\ \tau &= \eta \log_n \left[\frac{(n-1)\gamma}{\gamma_e} + 1 \right] G_0 \gamma \cdot \exp\left[- \left(\frac{1}{\gamma_p} \cdot \frac{\gamma}{\alpha} \right)^m \right] (1 - D_{\rm T}) \end{aligned}$	黄晓辉 ^[16]
$\frac{\tau_{\rm p}}{\tau_{\rm p-T}} = \kappa \left[1 + 0.3 \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_{\rm n}} \right) \cdot \frac{(T-20)}{1\ 000} \right]$	Tang ^[45]
$\sigma_1 - \sigma_3(T) = \frac{2C_i(T)\cos\varphi_i(T)}{1 - \sin\varphi_i(T)} + \frac{2\sin\varphi_i(T)}{1 - \sin\varphi_i(T)}\sigma_3 - \frac{2\sin\varphi_i(T)}{\sigma_{\text{crit}}(T)(1 - \sin\varphi_i(T))}\sigma_3^2$	Kumari ^[46]

性等工程都涉及到高温对岩体剪切行为的影响, 岩体 试样的高温处理共分为高温冷却和实时高温两种方 法。如图 2 所示, 对于高温冷却的方法, 通常是先利 用马弗炉等加温装置, 将试样加热到目标温度, 然后 取出放置到室内自然冷却或直接放入水中冷却冲击。 此类方法的优点是冷却后的试样方便开展实验, 但是 试样经过了两个热损伤过程, 包括升温热损伤和冷却 热损伤, 因此, 在实验结果中很难厘清两种热损伤的 作用程度。对于第二种实时高温处理的方法, 可以实 现岩体在原位高温环境下的物理力学参数测试, 针对 升温热损伤量化表征, 但实验难度较大, 对实验设备 要求较高。

如图 2 所示主要有两种高温处理方法:其一是采 用高温处理后的试样;其二是采用实时高温下的试样。 对于高温处理后的方法,通常是先利用马弗炉等加温 装置,将试样加热到目标温度,然后取出放置到室内 自然冷却或直接放入水中冷却冲击。此类方法的优 点是冷却后的试样方便开展实验,但是试样经过了两 个热损伤过程,包括升温热损伤和冷却热损伤,因此, 在实验结果中很难厘清两种热损伤的作用程度。对 于第二种实时高温处理的方法,可以实现岩体在原位 高温环境下的物理力学参数测试,针对升温热损伤进 行精确描述,但实验难度较大,对实验设备要求较高。

3.2 高温岩体剪切主要测试方法

实验室内测试岩体剪切参数的主要方法如图 3 所示,有变角剪切实验、直接剪切实验以及三轴压剪 实验三种。

3.2.1 变角剪切实验原理

变角剪切实验采用单轴加载方式和变角剪切实

验夹具,对试样进行不同角度的剪切力学参数测试。 试样轴向(或竖直)方向上施加的载荷(F)可通过变角 剪切实验夹具分解成沿剪切方向的剪应力(τ)和垂直 于剪切方向的正应力(σ)。单轴加载过程中随着轴向 载荷不断增大,剪应力τ和正应力σ均增大,试样破坏 时计算获取岩体剪切强度τ_p。实时高温下岩体变角剪 切实验原理如图4所示,需配备加温设备对试样进行 整体包裹加热,然后采用上述方式开展实验。变角剪 切实验方法可以真实模拟节理面剪切行为,通过调整 剪切夹具角度能分析不同倾角节理岩体的剪切特性, 且实验成本较低、易于开展,利用该实验方法进行加 载剪切时,剪切角度的变化可能导致加载装置中应力 分布不均匀,不同角度下剪切破裂面位置差异较大, 与直接剪切实验和三轴压剪实验相比,变角剪切实验 测得的剪切物理力学参数可能有一定偏差^[47]。

3.2.2 直接剪切实验原理

与土体直剪仪实验原理一致,岩石直接剪切实验 装备具有两个加载端,其中轴向加载(F)施加恒定的 法向应力(CNL)或恒定的法向刚度(CNS),侧向加载 施加剪应力(t)。在 CNL或 CNS 加载条件下,测试岩 体剪切破坏时的峰值剪切强度 tp。实时高温下岩体直 接剪切实验原理如图 5 所示,同样需配备加温设备对 试样进行整体包裹加热,然后采用上述方式继续开展 实验。直剪实验设备边界条件可控,可通过设置法向 载荷来模拟 CNL或 CNS 加载条件下岩体的剪切特性, 与变角实验方法相比,直剪实验下不同法向载荷加载 时岩石变形破坏模式基本相同,剪切破坏面清晰,并 且比较适合研究节理裂隙岩体裂隙面的剪切滑移规 律;但直接剪切实验只能对岩样施加单一法向载荷, 无法模拟真实岩体的三向应力赋存情况,同时直剪实



图 2 高温岩体剪切的试样处理方法

Fig. 2 Sample treatment method of high temperature rock mass shear



图3 高温岩体剪切实验方法

Fig. 3 Shear test method of high temperature rock mass



图 4 实时高温变角剪切实验原理⁽⁴⁸⁾ Fig. 4 Real-time high temperature variable angle shear experiment principle⁽⁴⁸⁾

验加载过程中在岩样边角会有边界效应显现,岩样边 缘容易出现应力集中现象。

3.2.3 常规三轴压剪实验原理

根据莫尔-库伦破坏准则,当岩体内任一平面的 剪应力达到岩石抗剪强度时,岩体会沿着该面剪切破 坏。常规三轴压剪测试依据该原理开展,实验时一般 先向围压腔注入高压液体对岩体表面施加围压(σ₂), 然后施加轴向载荷(σ₁),直至岩体破坏,以此获取岩体 三轴压缩剪切强度。实时高温下岩体常规三轴压缩 剪切实验原理如图 6 所示,同样需配备加温设备对试 样进行整体包裹加热。三轴压缩剪切实验通过围压 腔对岩体施加围压,可模拟深部岩体真实三向应力赋 存状态,并且还可以获得岩体泊松比及弹性模量等物 理力学参数,适用于完整均质岩体和裂隙岩体的三轴 压缩剪切实验;但三轴压缩剪切实验主要研究轴向加 载下岩样的整体强度和破坏模式,难以捕捉实验加载 过程中局部区域的剪切破坏演化规律,且由于此类实 验中采用了橡胶密封和液体传压介质,较难实现高温 200 ℃ 以上的热力耦合加载条件。

4 高温岩体剪切物理力学与变形特性

4.1 岩体剪切物理力学特性

当前针对高温岩体剪切物理力学特性的实验探 究,大多是采用高温处理后的试样开展,即对岩体加 热到高温后冷却处理(自然冷却、遇水冷却或液氨冷 却等),然后再进行实验。高温冷却处理后试样处于 常温状态,易于开展实验,但此类"加热-冷却"中的 "冷却"处理方法又会进一步对岩石造成热损伤或 热冲击损伤,使得岩体热破裂更加剧烈^[31]。采用实时 高温下的试样开展实验,即对岩体加热到高温后保温 一段时间,使试样内部也加热到预设温度,然后再进 行实验。此类"加热"的处理方法只对岩石造成原 位热损伤,可以开展岩石在原位高温环境下的剪切实 验,能更加精确表征岩石经历单一热应力损伤后的物 理力学特性,缺点是实时高温环境较难实现,实验难 度较大^[32]。

4.1.1 高温处理后岩体剪切特性

在"加热-冷却"的高温处理方法中,随着加热 温度的升高,岩体冷却后的力学性能一般表现出下





Fig. 5 Principle of real-time high temperature direct shear experiment[49]





图6 实时高温三轴压缩剪切实验原理¹⁰⁰

Fig. 6 Real-time high temperature triaxial compression-shear experiment principle^[50]

降趋势,尤其以水冷或液氨冷却等冲击式冷却下降更 剧烈。

决定岩石抗剪强度的重要参数是黏聚力和内摩 擦角。高温岩体黏聚力和内摩擦角与常温状态相差 较大,需深入探究其温度依赖性。Zhang 等^[3] 开展了 900 ℃下高温水冷后花岗岩三轴压剪实验,发现在常 温~300 ℃内随温度升高花岗岩黏聚力一直增加,在 300~500 ℃内, 黏聚力几乎保持恒定, 在 500~900 ℃ 内随温度升高黏聚力不断下降,随温度增加内摩擦角 的变化则与黏聚力正相反: Liu^[54] 同样发现随温度增加 花岗岩黏聚力与内摩擦角均呈阶段性变化,且表现出 相反的变化趋势,随温度升高黏聚力在 0~150 ℃ 内一 直增加,随后则不断下降。黄晓辉[™]开展了800℃下 高温自然冷却后砂岩变角剪切实验,指出砂岩的黏聚 力在常温~200 ℃ 内随温度上升增加, 200~800 ℃ 内缓 慢下降;内摩擦角在常温~200 ℃内降低, 200~600 ℃ 内不断增加,最后在600℃后随温度上升再次降低。 Tang^[55]研究了高温加热后保温持续时间对大理岩剪 切特性的影响,发现在加热升温后不同保温持续时间 下,随温度升高大理岩黏聚力的变化趋势相似,都在 常温~300 ℃ 内随温度升高缓慢增加, 300~600 ℃ 内随 温度升高快速下降;但是随温度升高内摩擦角与黏聚 力的变化趋势大体相反,且内摩擦角温度效应,拐点 为 200 ℃。

温度和围压都是影响岩石三轴压缩剪切力学特 征的重要因素,在试样高温劣化了岩石的力学性能, 加载围压可以在一定程度上抑制裂纹发展,部分抵消 高温热应力的劣化损伤,尤其在高围压下抵消作用更 显著。Yang 等^[5] 采用室温~800 ℃ 内高温处理后的试 样,开展了高温高压下砂岩三轴压剪实验,发现在低 围压下,砂岩剪切强度的温度效应表现出明显的分阶 段特征;当围压较高时,砂岩剪切强度随温度上升则 恒定增加,同时得出随温度上升砂岩黏聚力和内摩擦 角表现出大致相反的变化规律;黏聚力则在 300 ℃ 之 前随着温度上升缓慢增加,超过 300 ℃ 后则随温度上 升剧烈下降。Zhu^[57]通过常规三轴实验探究了 600 ℃ 内花岗岩的热力强化效应,发现 150 ℃ 是花岗岩力学 性能得到热力强化的阈值温度,超过 150 ℃ 后剪切强 度持续下降,尤其是 500 ℃ 开始显著下降;同时观察 到在 300 ℃下高围压对高温冷却处理造成力学性能 损伤的限制作用较好。

为明确高温冷却处理的热冲击效应对裂隙岩体 剪切特性的影响, Zhao^[59]开展了 400 ℃ 高温自然冷却 后含预制裂隙花岗岩直剪实验, 指出随着温度上升其 剪切强度一直降低; Zheng^[59]将温度提高到 800 ℃, 同 样发现随温度升高裂隙花岗岩剪切强度一直降低, 其 中 500 ℃ 左右剪切强度降低最剧烈; Tang^[69] 同样发现 在常温~400 ℃ 内, 裂隙花岗岩剪切强度随温度上升 缓慢增长, 在 400~800 ℃ 内则随温度上升快速降低, 并且降低的剧烈程度与施加的法向载荷大小呈正相 关关系, 黏聚力与内摩擦角表现出大致相同的温度依 赖性, 在常温~300 ℃ 内随温度上升都快速增长, 在 300~800 ℃ 内随温度上升缓慢降低; Alneasan^[61]开展 了 500 ℃ 下高温自然冷却后裂隙砂岩直剪实验, 发现 随温度升高砂岩剪切强度和内摩擦角的变化趋势一 致, 均在 250 ℃ 时增长到最大值, 然后开始不断下降。

目前研究人员采用不同类型岩体的剪切实验,探 究了高温处理后岩体的剪切特性,在岩体经历高温处 理后,随温度增加岩体黏聚力、内摩擦角和剪切强度 一般呈现分阶段变化的趋势,岩体热力强化效应的阈 值温度表现在 200~300 ℃ 左右,随后在 600 ℃ 附近岩 体剪切强度显著下降,原因可能是高温冷却处理导致 岩体内部裂纹大量扩展贯通,显著弱化了岩体的强度。

4.1.2 实时高温下岩体剪切特性

实时高温下岩体力学实验难度大,其实验研究成 果相对较少。赵阳升等[™]研发了 600 ℃ 20 MN 伺服 控制的高温高压岩体三轴试验机,可以实现实时高温 600 ℃内大尺度原位耦合实验。利用该大型三轴试 验机, 万志军等^[62]在实时高温 600 °C 下, 测试了 φ200 mm×400 mm 花岗岩物理力学特性,揭示了花岗岩弹 性模量随温度变化的三个阶段:常温~200 ℃内其弹 性模量随温度上升略微降低, 200~400 ℃内随温度上 升快速降低,400~600 ℃内随温度上升基本保持不变; Ma^[6]开展了实时高温 400 ℃下完整花岗岩的真三轴 压剪实验,发现其黏聚力在常温~400℃内随温度升 高缓慢上升,内摩擦角的温度效应不太明显,加温过 程中几乎保持恒定不变,弹性模量则在400℃下随温 度升高表现出周期性波动起伏; Xu^[4] 通过实时高温 800 ℃下花岗岩常规三轴压剪实验,发现其剪切强度 在 0~200 ℃ 内随温度升高小幅增长, 200~800 ℃ 内大 幅下降,其中以600 ℃时下降最为剧烈;Guo^[65]开展了 实时高温400℃下花岗岩真三轴压剪实验,发现其剪 切强度随温度上升先略微增高后迅速降低,且不同围 压下热强化效应阈值均为 200 ℃; Chen^[6] 通过实时高 温 300 ℃ 下花岗岩直剪实验,发现随温度上升,花岗 岩剪切强度、内摩擦角和黏聚力都呈现出不断下降的 趋势,其中高法向应力下热冲击对其力学性能的损伤 更显著;张塑彪[™]进行了实时高温 400 ℃ 下粗粒及细 粒花岗岩三轴压剪实验,发现两种花岗岩黏聚力在 25~300 ℃ 内均随温度上升缓慢增加,其中粗粒花岗 岩的增幅是细粒的 5.73 倍,温度强化效应更显著。

实时高温下花岗岩、砂岩及大理岩的力学性能差 异较大,马阳升^(%)研究了实时高温 800 ℃下三种典型 干热岩随温度升高剪切强度的变化趋势:花岗岩的剪 切强度在室温~200 ℃ 随温度升高大幅增加、200~ 800 ℃则开始下降,其中以 200~400 ℃ 内下降最剧烈; 随温度升高砂岩剪切强度与花岗岩剪切强度的变化 趋势正好相反;大理岩的剪切强度在室温~200 ℃ 内 随温度升高先增加,在 200~600 ℃ 内不断降低、最 后 600~800 ℃ 内又急剧增加,总体表现为增长趋势。

Zhou^[69]开展了实时高温 180 ℃下花岗岩常规三 轴压缩剪切实验,发现其剪切强度随温度上升一直缓 慢下降; 黏聚力随着温度上升不断降低,而内摩擦角 变化趋势则与其相反; Chen^[70]发现在实时高温 140 ℃ 下,花岗岩热力强化效应的温度阈值为 60 ℃,在 60 ℃ 后随温度上升花岗岩剪切强度开始下降; Liu^[71]开展了 实时高温 120 ℃下花岗岩常规三轴压剪实验,发现其 剪切强度和黏聚力随温度上升不断降低,内摩擦角的 温度效应不明显,随温度上升几乎保持不变;之后 Liu^[7]将温度条件提高到 240℃,发现随温度升高花岗 岩剪切强度仍一直降低。

为明确实时高温对裂隙岩体剪切特性的影响, Wang^[73]开展了实时高温 400 ℃ 下含预制裂隙花岗岩 直剪实验,发现其剪切强度热力强化效应的拐点温度 为 300 ℃, 超过 300 ℃ 后剪切强度随温度升高逐渐下 降,黏聚力在常温~200 ℃随温度升高大幅增长, 200~400 ℃ 略微降低, 随温度升高内摩擦角则呈现出 和黏聚力相反的变化趋势; Li[™]在实时高温 400 ℃下 含预制裂隙花岗岩直剪实验中发现,岩体剪切强度随 温度上升一直降低,在200℃后降低更剧烈降低,黏 聚力和内摩擦角都随温度上升呈现出下降趋势; Meng^[49]在实时高温 400 ℃ 下裂隙花岗岩直剪实验中, 对开始直接剪切前的试样设置了两种不同的热处理 方式,分别是先对岩样预加载法向应力然后进行高温 加热,和先对岩样高温加热后再施加法向应力,发现 两种处理方式测得的裂隙花岗岩剪切强度都表现出 类似的热力强化效应,但先预加载法向应力再高温加 热的裂隙花岗岩随温度上升剪切强度增加更显著; Jiang^[75]发现随着温度升高,裂隙花岗岩黏聚力与低法 向应力下剪切强度的变化一致,都是在常温~100 ℃ 先增加,100~300℃不断减小,随温度升高裂隙花岗岩 内摩擦角与高法向应力下的剪切强度都呈现出不断 下降的趋势。

实时高温下,高温岩体只经过热应力这一加热过 程,此类热处理方式更能体现高温岩体原位热损伤状 态。研究者设置了高温下不同增温梯度及岩体类型, 发现随温度升高岩体黏聚力和剪切强度变化趋势大 致相同,都表现出一定的热力强化效应,原因可能是 热应力作用下岩体内部矿物颗粒热膨胀闭合了部分 初始裂隙,使岩体整体力学特性得到一定增强。

4.2 剪切变形特性

高温处理后和实时高温下岩体变形破坏模式与 常温岩体相差不大。温度和围压同时控制着高温后 岩体的变形破坏行为,高温作用后岩体内部热致裂纹 发育扩展,峰值应变增大,变形特性逐渐由脆性向延 性转变^[63,7677]。随着温度升高,花岗岩、砂岩和大理岩 的宏观破坏模式相似,都是由剪切破坏过渡到拉剪破 坏,即常温下表现出单一剪切面贯穿的破坏形式,在 高温下则呈现出张拉和剪切共存的复合拉剪破坏模 式^[46,56,78]。

随着温度升高,花岗岩、砂岩和大理岩的宏观破 坏模式相似,都是由剪切破坏过渡到拉剪破坏,即常 温下表现出单一剪切面贯穿的破坏形式,在高温下则 呈现出张拉和剪切共存的复合拉剪破坏模式^[46,56,78]。

施加围压可以抑制岩体因热损伤发育扩展的热

致裂纹和剪切过程中的侧向变形^[56,79]。高温岩体在相 对较低的围压下表现出脆性特征,沿着倾斜的宏观剪 切带剪切破坏;随围压升高,在中等围压下可以观察 到高温岩体局部呈现出共轭剪切带的演化特征;在高 围压下岩体剪切破坏时可以观察到多个共轭剪切带^[46]。

4.2.1 高温处理后岩体变形破坏特征

Wang 和 Zhang^[80-81]利用高速摄像机 DIC 记录高 温花岗岩变角剪切实验的全过程,发现随着温度升高, 峰值剪切破坏时沿剪切方向的剪切应变数大量增加, 宏观剪切断裂带宽度变大,剪切断裂带两侧的拉伸裂 纹显著减少,花岗岩破坏模式由拉剪混合破坏转化为 单一剪切破坏。Jiang^[82]对完整花岗岩直剪后断面凹 凸体特征进行分析,发现随温度增加,剪切断面微凸 体高度和表观倾角均增大。常温三轴压缩实验下,高 温花岗岩表现出整体剪切破坏特征;随着围压的增大, 破坏面与最大主应力方向的夹角增大,剪切破坏带的 宽度也会增加^[83-84]。

黄晓辉¹¹⁶利用 DIC 记录了 800 ℃ 内砂岩变角剪 切实验的全过程,发现随着温度升高,砂岩表面的剪 切应变数显著增加,各应变带逐渐扩展,在600 ℃ 下 连接成贯通的剪切应变带;Yin^[85]通过 800 ℃ 下砂岩 真三轴压缩剪切实验发现,随温度增加,剪切断裂面 面积损伤及粗糙体剥落体积损失更严重,砂岩裂纹会 沿着最小主应力方向倾斜弯曲或偏转^[86],在高法向应 力下砂岩呈现出"X"共轭剪切的破坏形态,并且高 温下该共轭剪切破坏形态表现更显著;高温砂岩常规 三轴和真三轴压缩剪切下破坏形式相似,在常规三轴 加载条件下,高温砂岩出现更多横向拉伸裂纹和剪切 裂纹,呈现出张拉和剪切共存的复合拉剪破坏模式^[59]。

4.2.2 实时高温下岩体变形破坏特征

Liu^[87]将实时高温下花岗岩剪切过程分为四个阶 段,分别是中心应变集中阶段、裂纹集结成核阶段、 宏观裂纹扩展阶段以及剪切破坏阶段,其中第三阶段 受温度变化的影响最大,该阶段150℃下花岗岩的破 坏主要表现为单剪切裂纹的扩展贯穿,高温 300 ℃下 热应力导致花岗岩内部出现大量热致裂纹,花岗岩沿 剪切方向表现出两条平行的主剪切裂纹。阴伟涛188 发现高温花岗岩首先从端部形成单斜面剪切破坏面, 逐渐扩展成沿粗晶粒的新剪切破裂面; Chen⁶⁶发现高 温高压岩体直剪破坏演化规律主要与法向应力有关, 高法向应力促进了内部矿物颗粒的压缩变形,随着法 向应力增大其变形破坏模式会由拉剪混合破坏模式 转变为纯剪切破坏模式,高温影响了剪切断裂面的形 貌特征,随着温度升高,花岗岩剪切断裂形貌粗糙度 和各向异性都在显著增大: Guo⁶⁵也同样发现随着温 度升高,剪切磨损区域增加,且剪切破坏面的粗糙度

逐渐增大。花岗岩常规三轴压缩剪切实验中,在较小的温度范围内,花岗岩的破坏模式主要由围压影响控制^[49];花岗岩真三轴剪切实验中,随温度升高,主剪切裂纹附近发育了大量细小的裂纹,表现出明显的应变软化特征,花岗岩由剪切破坏转向拉剪混合破坏模式^[59]。

5 高温岩体微观结构演化特征

岩体在宏观上的力学性能变化可以通过微观结构进行表征,表征的主要手段包括扫描电子显微镜(SEM)、工业CT、X射线衍射仪(XRD)及核磁共振技术(NMR)等。

5.1 热应力对岩石微观结构的影响

通过 SEM 扫描电镜可以观察到高温岩体微观结构的损伤状态。相关研究者发现 25~200 ℃内,花岗岩内部结构致密,矿物胶结程度较好几乎没有微裂纹;在 200~400 ℃内,花岗岩内部水分逸出蒸发,长石石英颗粒不均匀热膨胀导致沿晶裂纹在其间萌生扩展;400~600 ℃内,花岗岩内部矿物相变或熔化热分解,穿晶裂纹大量发育,裂纹张开度和裂纹密度显著增加^[67,90]。

对高温岩体剪切滑移后的断面扫描分析,发现高 温下黑云母矿物颗粒韧性增强是高温花岗岩脆性向 延性转变、力学性能得到强化的主导因素^[63];在裂隙 微观图像上,随温度增加高温岩体裂隙面剪切磨损下 来的粗糙体体积变大,同时随法向应力增大剪切行为 对粗糙裂隙面的磨损更严重^[609]。

利用 CT 扫描技术, 赵阳升等^[92] 认为花岗岩热破 裂首先沿颗粒胶结界面发生。高温作用下花岗岩内 部矿物晶间裂纹在 300~500 ℃ 范围内大量出现, 在 750 ℃ 时内部热破裂裂纹进一步扩展连通并几近贯 穿整个岩体, 有形成裂隙网络的趋势^[93]。在加温过程 中, 随着温度增加, 热破裂首先并主要发生在岩体表 面, 而在岩体内部相对较少^[94]。

花岗岩的晶体主要是由斜长石、钾长石、石英和 黑云母等矿物组成。利用 X 射线衍射技术,研究者分 析了高温下花岗岩晶体结构和矿物组分的演化规律, 发现斜长石在 800 ℃ 时化学键断裂,开始大量热分解, 矿物含量和结构稳定性显著下降,而热解过程中钾长 石含量快速升高;石英具有较好的热稳定性,高温下 仅发生多晶型转变,含量变化不大,但石英颗粒在 573 ℃ 时α-β物相变化,导致其晶体结构发生较大改变,稳 定性显著下降;黑云母从 200 ℃ 开始热解,800 ℃ 时 黑云母含量下降最快,800 ℃ 时花岗岩内部剧烈损伤, 沿晶裂纹和穿晶裂纹显著扩展贯通,严重破坏了花岗 岩内部晶体结构^[9]。

核磁共振(NMR)检测发现常温~200 ℃ 内随温度 增加花岗岩内部孔隙数目和尺寸均降低,200~500 ℃ 内孔隙数目和尺寸均开始缓慢增加,500 ℃ 之后热破 裂显著,花岗岩内部孔隙数目和尺寸均大幅增加,中 小孔径孔隙迅速相互贯通扩展,形成较大的孔隙^[96-97]。

5.2 热冲击对岩石微观结构的影响

高温下岩体内部矿物颗粒非均匀膨胀,发生热破裂;高温冷却处理后矿物颗粒高速收缩变形,导致岩体内部和外部存在较高的温度梯度,发生热冲击破裂。 热冲击新产生的裂纹与升温过程中热应力产生的裂 纹互相扩展沟通,岩体内部破裂程度更大,因此其破 坏力一般远大于热应力破裂,会显著劣化岩体的强度^[98]。

利用 SEM 扫描电镜,可以观察到与自然冷却相 比,水冷作用下岩体内部孔隙中充满大量水,对矿物 颗粒之间的胶结产生一定的拉应力,岩体内部微裂纹 和微孔隙数量显著增大,其中微裂纹的开口和长度、 微孔隙的尺寸均发育更明显,穿晶裂纹的破坏程度也 更广;且在更高温度的热冲击下岩体内部出现复杂的 裂隙网络,内部破裂更严重^[9-10]。

对高温处理后的花岗岩开展了 CT 扫描实验,相关研究者发现热冲击主要作用于岩石的边缘或端部 区域,岩石边缘处裂纹大量发育^[101-102]。与自然冷却相 比,水冷作用后热破裂积聚更多,水的存在也导致矿 物晶间胶结物质溶解,加剧了岩石内部细观损伤,微 裂纹大量扩展发育,破裂程度剧烈^[103]。

采用X射线衍射技术可以发现,与自然冷却相比, 水冷作用下岩体内部晶体结构破坏更严重,内部矿物 与水反应生成新的矿物,其中主要化学组分SiO₂、 CaO和MgO分别与水反应生成H₄SiO₄、Ca(OH)₂和 Mg(OH)₂,生成物对原生的裂缝和缺陷具有一定的修 复作用,但总体上力学性能仍显著降低^[9,104]。

通过核磁共振仪(NMR)可以定量表征热冲击作 用下岩体内部微裂缝和微孔隙的演化,发现在相同的 冷却方式下,随着温度升高,常温~400℃下孔隙率缓 慢增加,400~600℃下孔隙率快速增加;当热处理温 度大于 200℃后,水冷和自然冷却作用对岩体内部孔 隙率的改变表现出一定差异性。在相同的温度条件 下,尤其是高温 600℃时,与自然冷却相比,水冷处理 下岩体内部大孔径孔隙占比显著增加,并且大孔径孔 隙的增加是孔隙率上升的主导因素^[105-106]。

6 结论与展望

围绕干热岩所处的高温高压环境,介绍了常温及高温岩体剪切本构模型,评述了高温岩体剪切过程峰 值剪切强度、黏聚力和内摩擦角的温度效应,并概括 总结了高温高压岩体宏观变形破坏特征及微观结构 演化规律,主要结论如下:

(1)高温处理后和实时高温下干热岩黏聚力与剪 切强度随温度升高均呈现分阶段变化趋势,一般在常 温~300 ℃内,随温度增加而升高;在 300 ℃之后,随 温度增加而降低,尤其是在 500~600 ℃ 之间剪切强度 显著降低。

(2)高温处理后完整干热岩内摩擦角随温度增加 总体呈上升趋势,而裂隙干热岩内摩擦角随温度增加 总体呈降低趋势;实时高温下干热岩内摩擦角对温度 并不敏感,随温度增加变化不明显,还需深入探究其 温度依赖性。

(3)实时高温条件下,在常温~300℃左右,随温 度增加,干热岩矿物颗粒热膨胀效应使得干热岩内部 孔隙结构趋于致密,剪切强度可能得到增强;加热到 300℃之后,岩体内部热破裂活动剧烈,剪切强度降 低,在 500~600℃之间花岗岩内部石英颗粒相变,剪 切强度显著下降。

(4)现有高温岩体剪切模型理论研究较少,围绕 干热岩所处的高温高压环境,可修正或提出适用于深 部干热岩开发的高温岩体剪切强度准则或损伤模型。 基于热应力对岩体微观结构的影响,可考虑在较温和 的温度范围下,限制更密集的温度上升梯度,掌握高 温岩体剪切物理力学特性。

参考文献:

- [1] 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估
 [J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
 WANG J Y, HU S B, PANG Z H, et al. Estimate of geothermal
 - resources potential for hot dry rock in continental area of China[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 25–31.
- [2] 国家能源局. 地热能术语: NB/T 10097-2018[S]. 北京: 中国石化 出版社, 2018.
 National Energy Administration. Terminology of geothermal energy.
 - NB/T 10097–2018[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2018.
- [3] 李胜涛,张森琦,贾小丰,等.干热岩勘查开发工程场地选址评价 指标体系研究[J].中国地质调查,2018,5(2):64-72.
 LI S T, ZHANG S Q, JIA X F, et al. Index system research of project site selection for dry hot rocks exploration[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(2): 64-72.
- [4] 谭现锋,张强,战启帅,等.干热岩储层高温条件下岩石力学特性研究[J].钻探工程,2023,50(4):110-117.
 TAN X F, ZHANG Q, ZHAN Q S, et al. Study on rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 110-117.

[5] 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 C, HU S B, HUANG R H, 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.
 [6] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报, 2017, 38(4): 449-459.
 WANG G L, ZHANG W, LIANG J Y, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4): 449-459.
- [7] 许家鼎,张重远,张浩,等.青海共和盆地干热岩地应力测量及其 对储层压裂改造的意义[J].地学前缘,2024,31(6):130-144. XU J D, ZHANG C Y, ZHANG H, et al. In-situ stress measurements in hot dry rock of the Qinghai Gonghe Basin and their significance for reservoir fracture modification. Earth Science Frontiers[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(6):130-144.

[8] 郭亮亮. 增强型地热系统水力压裂和储层损伤演化的试验及模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
 GUO L L. Test and model research of hydraulic fracturing and

reservoir damage evolution in enhanced geothermal system[D]. Changchun: Jilin University, 2016.

- [9] 李根生, 武晓光, 宋先知, 等. 干热岩地热资源开采技术现状与挑战[J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 343-364.
 LI G S, WU X G, SONG X Z, et al. Status and challenges of hot dry rock geothermal resource exploitation[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 343-364.
- [10] 张洪伟.裂隙岩体剪切一渗流一传热特性及断层地热开发研究
 [D].徐州:中国矿业大学,2020.
 ZHANG H W. Shear-seepage-heat transfer characteristics of rock fractures and a fault EGS system[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2020.
- [11] 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.
 ZHANG H W, WAN Z J, ZHAO Y X, et al. A review of the research on the mechanism of hydro-shearing in geothermal reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3172-3185.
- [12] 李玮枢.高温花岗岩水冷破裂模式与水压裂缝扩展规律研究
 [D].济南:山东大学,2020.
 LI W S. Study on water-cooling cracking modes and hydraulic fracture propagation law of high-temperature granite[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.
 [13] 张宁.高温三轴应力下花岗岩蠕变一渗透一热破裂规律与地热
- [13] 示了: 尚溫二油应为下花闵石壩交一後透一於破袭残件马起蒸 开采研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014. ZHANG N. Research of creep-penetration-thermal cracking of granite under high temperature and 3D stresses and extraction of geothermal energy[D]. Taiyuan: Taiyuan university of technology, 2014.
- [14] 万志军,赵阳升,康建荣.高温岩体地热资源模拟与预测方法
 [J].岩石力学与工程学报,2005(6):945-949.
 WAN Z J, ZHAO Y S, KANG J R. Simulation and forecast method of geothermal resources in hot dry rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(6): 945-949.
- [15] 郭沛.热处理花岗岩物理力学及损伤特性研究[D].北京:北京 科技大学,2023.
 GUO P. Study on physical and mechanical properties and damage

characteristics of heat-treated granite[D]. Beijing: University of science and technology Beijing, 2023.

 [16] 黄晓辉. 高温处理后红砂岩剪切破坏特性试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2024.
 HUANG X H. Experimental study on shear failure characteristics of red sandstone after high temperature treatment[D]. Changsha: Central

south university, 2024 [17] 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.

TANG J W, LI J F, FANG J, et al. On the development status and future direction of enhanced geother-mal system experimental simulation equipment[J]. Science & Technology Review, 2024, 42(15): 69–81.

- [18] 赵阳升, 万志军, 张渊, 等. 20MN 伺服控制高温高压岩体三轴试 验机的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(1): 1-8. ZHAO Y S, WAN Z J, ZHANG Y, et al. Research and development of 20 MN servo-controlled rock triaxial test system with high temperature and high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(1): 1-8.
- [19] 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.
- [20] 孙勇, 翟成, 丛钰洲, 等. 温度冲击效应诱导干热岩孔裂隙结构 演化及损伤破坏机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4855-4872. SUN Y, ZHAI C, CONG Y Z, et al. Pore fracture structure evolution and damage failure mechanism of hot dry rock induced by temperature

impact effect[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4855-4872.

- [21] 胡跃飞.花岗岩物理力学和破裂特征随温度作用的演化规律研究[D].太原:太原理工大学,2023.
 - HU Y F. Study on the evolution of physical-mechanical and fracture characteristics of granite with temperature effect[D]. Taiyuan: Taiyuan university of technology, 2023.
- [22] 吴星辉,蔡美峰,任奋华,等.不同热处理作用下花岗岩纵波波 速和导热能力的演化规律分析[J].岩石力学与工程学报,2022, 41(3):457-467.

WU X H, CAI M F, REN F H, et al. Evolutions of p-wave velocity and thermal conductivity of granite under different thermal treatments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(3): 457–467.

- [23] 陈墨香,汪集旸,邓孝.中国地热资源——形成特点和潜力评估 [M].北京:科学出版社,1994. CHEN M X, WANG J Y, DENG X. China's geothermal resources, the characteristics and potential evaluation[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [24] 张英, 冯建赟, 何治亮, 等. 地热系统类型划分与主控因素分析
 [J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 190-198.
 ZHANG Y, FENG J Y, HE Z L, et al. Classification of geothermal systems and their formation key factors[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 190-198.
- [25] 蔺文静,王贵玲,邵景力,等.我国干热岩资源分布及勘探:进展与启示[J].地质学报,2021,95(5):1366-1381.
 LIN W J, WANG G L, SHAO J L, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: Progress and inspiration[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5): 1366-1381.
- [26] 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.
 ZHANG W, JIN X P, WANG H H, et al. Review on progress of the utah forge project for demonstration of hot dry rock development[J].
- World Sci-Tech R & D 2024, 46(2): 263-276.
 [27] JONES C G. Petrologic, fluid inclusions and stable isotope (oxygen and carbon) studies of geothermal systems in utah and california[D].
- Utah: The University of Utah, 2022. [28] GéRARD A, GENTER A, KOHL T, et al. The deep EGS (Enhanced Geothermal System) project at Soultz-sous-Forêts (Alsace, France) Soultz-sous-Forêts[J]. Geothermics, 2006, 35(5): 473–483.
- [29] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].地 学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
 WANG G L, LIU Y G, ZHU X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [30] 许天福,文冬光,袁益龙.干热岩地热能开发技术挑战与发展战略[J].地球科学,2024,49(6):2131-2147.
 XU T F, WEN D G, YUAN Y L. Technical challenges and strategy of geothermal energy development from hot dry rock[J]. Earth Science, 2024, 49(6): 2131-2147.
- [31] 齐晓飞,肖勇,上官拴通,等.马头营深层干热岩人工造储裂缝 扩展机理研究与应用[J].地学前缘,2024,31(6):224-234.
 QI X F, XIAO Y, SHANGG S T. et al. Study and application on the fracture's propagation mechanism of artificially reservoir in deep hot dry rocks in Matouying, 2024,31(6): 224-234.
- [32] S. C. BANDIS, A. C. LUMSDEN, N. R. BARTON. Fundamentals of rock joint deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6).
- [33] GOODMAN R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks [M]. St. Paul : West Pub. Co, 1976.
- [34] SAEB S, AMADEI B. Modelling rock joints under shear and normal loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(3): 267–278.
- [35] R. SIMON. Analysis of fault-slip mechanisms in hard rock mining[D]. Quebec/Montreal: McGill University, 1999.

- [36] 唐志成,夏才初,肖素光.节理剪切应力-位移本构模型及剪胀 现象分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):917-925. TANG Z C, XIA C C, XIAO S G. Constitutive model for joint shear stress-displacement and analysis of dilation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 917-925.
- [37] 唐志成,夏才初,黄继辉,等.节理峰值后归一化位移软化模型
 [J].岩土力学,2011,32(7):2013-2016+2024.
 TANG Z C, XIA C C, HUANG J H, et al. Post-peak normalized displacement softening model for discontinuous rock joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2013-2016+2024.
- [38] PARK J W, LEE Y K, SONG J J, et al. A constitutive model for shear behavior of rock joints based on three–dimensional quantification of joint roughness[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(6): 1513–1537.
- [39] 肖卫国, 兑关锁, 陈铁林, 等. 剪胀和破坏耦合的节理岩体本构 模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2535-2543.
 XIAO W G, DUI G S, CHEN T L, et al. A study of constitutive model coupling dilatancy and degradation for jointed rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2535-2543
- [40] 赵延林,万文,王卫军,等.随机形貌岩石节理剪切数值模拟和 非线性剪胀模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1666-1676.
 ZHAOYL, WANW, WANGWJ, et al. Shear numerical simulation of random morphology rock joint and nonlinear shear dilatancy

model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1666-1676.
[41] 郤保平,何水鑫,成泽鹏,等.传导加热下花岗岩中热冲击因子

 [41] 品味中,阿尔娅, 两户册, 9: [45] 加热中化因有平热中面有了 试验测定与演变规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1356–1368.
 XI B P, HE S X, CHENG Z P, et al. Thermal shock factor measurement and its evolution in granite under conduction heating[J].

Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1356–1368.
[42] 唐世斌,唐春安,朱万成,等.热应力作用下的岩石破裂过程分

- [42] 居區風,居住又,不万成,号: 照应万作用中的名句被表过往方析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(10): 2071–2078.
 TANG S B, TANG C A, ZHU W C, et al. Numerical investigation on rock failure process induced by thermal stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(10): 2071–2078.
- [43] HOMAND-ETIENNE F, HOUPERT R. Thermally induced microcracking in granites: characterization and analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1989, 26(2): 125–134.
- [44] 潘继良.花岗岩高温及化学改性劣化机理与损伤演化规律研究
 [D].北京:北京科技大学, 2023.
 PAN J L. Study on deterioration and damage mechanism of granite modified by high-temperature and chemical stimulation[D]. Beijing: University of science and technology Beijing, 2023.
- [45] TANG Z C, ZHANG Y. Temperature-dependent peak shear-strength criterion for granite fractures[J]. Engineering Geology, 2020, 269: 105552.
- [46] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite under in-situ stress and temperature conditions: An application to geothermal energy extraction [J]. Geothermics, 2017, 65: 44–59.
- [47] GONG F Q, LUO S, LIN G, et al. Evaluation of shear strength parameters of rocks by preset angle shear, direct shear and triaxial compression tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 2505–2519.
- [48] 张鹏宇,杨栋,赵建忠.实时高温作用下油页岩变角剪切特性实 验研究[J].太原理工大学学报,2022,53(6):1031-1037. ZHANG P Y, YANG D, ZHAO J Z. Experimental study on variable angle shear characteristics of oil shale under real-time high temperature[J]. Taiyuan University of Technology, 2022, 53(6): 1031-1037.
- $\left[\mbox{ 49 } \right] \quad \mbox{MENG F Z, HAN J, LI Z, et al. The sequence of heating and loading}$

affects shear properties of granite fractures under high temperature [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(9): 6543–6566.

- [50] WANG K, LIU Z, WU M, et al. Experimental study of mechanical properties of hot dry granite under thermal-mechanical couplings[J]. Geothermics, 2024, 119: 102974.
- [51] MICHIE U M L. Deep geological disposal of radioactive waste a historical review of the UK experience[J]. Interdisciplinary Science Reviews, 1998, 23(3): 242–257.
- [52] 罗生银,窦斌,田红,等.自然冷却后与实时高温下花岗岩物理 力学性质对比试验研究[J].地学前缘,2020,27(1):178-184. LUO S Y, DOU B, TIAN H, et al. Comparative experimental study on physical and mechanical properties of granite after natural cooling and under real time high temperature[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 178-184.
- [53] ZHANG F, ZHAO J, HU D, et al. Laboratory investigation on physical and mechanical properties of granite after heating and water-cooling treatment[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51: 677-694.
- [54] LIU J F. Creep characteristics of thermally-stressed Beishan granite under triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 162: 105302.
- [55] TANG Z C, SUN M, PENG J. Influence of high temperature duration on physical, thermal and mechanical properties of a fine-grained marble[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156: 34–50.
- [56] YANG S Q, XU P, LI Y B, et al. Experimental investigation on triaxial mechanical and permeability behavior of sandstone after exposure to different high temperature treatments[J]. Geothermics, 2017, 69: 93–109.
- [57] ZHU D. Experimental study on physico-mechanical responses and energy characteristics of granite under high temperature and hydro-mechanical coupling [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 63: 105245.
- [58] ZHAO Z, DOU Z, XU H, et al. Shear behavior of beishan granite fractures after thermal treatment[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 213: 223–240.
- [59] ZHENG F. Research on the shear failure behavior and acoustic emission characteristics of natural sandstone structural surfaces after high-temperature treatment[J]. Environmental Earth Sciences, 2025, 84: 14.
- [60] TANG Z C. Experimental investigation on temperature-dependent shear behaviors of granite discontinuity[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 4043–4060.
- [61] ALNEASAN M. Thermo-mechanical behavior of sandstone joints: Findings from direct shear tests[J]. Engineering Geology, 2024, 340: 107671.
- [62] 万志军,赵阳升,董付科,等. 高温及三轴应力下花岗岩体力学 特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(1): 72-77. WAN Z J, ZHAO Y S, DONG F K, et al. Experimental study on mechanical characteristics of granite under high temperatures and triaxial stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(1): 72-77.
- [63] MA X, WANG G, HU D, et al. Mechanical properties of granite under real-time high temperature and three-dimensional stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 136: 104521.
- [64] XU Z, ZHONG X, ZHANG S, et al. Experimental study on mechanical damage and creep characteristics of Gonghe granite under real-time high temperature [J]. Geothermics, 2024, 123: 103100.
- [65] GUO J, FENG Z J, LI X. Shear strength and energy evolution of granite under real-time temperature [J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8471.
- [66] CHEN B, SHEN B, JIANG H. Shear behavior of intact granite under thermo-mechanical coupling and three-dimensional morphology of shear-formed fractures[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(3): 523–537.
- [67] 张塑彪,张帆,李康文,等.高温对不同粒径花岗岩剪切特性影

响研究[J]. 岩土力学, 2024(10): 1-13.

ZHANG S B, ZHANG F, LI K W, et al. Study on the influence of high temperature on the shear characteristics of granite with different particle sizes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(10): 2981–2993.

- [68] 马阳升.实时高温作用下岩石力学特性实验研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.
 MA Y S. Experimental study on rocks mechanical properties under real-time high temperature[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [69] ZHOU H, LIU Z, SHEN W, et al. Mechanical property and thermal degradation mechanism of granite in thermal-mechanical coupled triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 160: 105270.
- [70] CHEN G, WANG J, LI J, et al. Influence of temperature on crack initiation and propagation in granite[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(8): 04018094.
- [71] LIU Z, WANG H, LI Y, et al. Triaxial compressive strength, failure, and rockburst potential of granite under high-stress and ground-temperature coupled conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(2): 911–932.
- [72] LIU Z, WANG C, ZHANG M, 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.
- [73] WANG P, WANG C, WANG G, et al. Experiment study on shear behavior and properties of granite fractures under real-time high-temperature conditions[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2024, 38: 100539.
- [74] LI Y Y, DANG J M, ZHANG S C, et al. Shear mechanical properties and surface damage characteristics of granite fractures treated by real-time high temperature[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(6): 2004–2017.
- [75] JIANG T. Thermal stimulation mechanical response and shear dilatation predictive model improvement of granite fractures in an enhanced geothermal system[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 4334-4349.
- [76] 王磊,张睿,杨栋,等.实时高温富有机质页岩变角剪切力学特性及应变场演化研究[J].岩土力学,2023,44(9):2579-2592.
 WANG L, ZHANG R, YANG D, et al. Mechanical properties and strain field evolution of organic-rich shale with variable angle shear at real-time high-temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(9): 2579-2592.
- [77] 卢运虎,王世永,陈勉,等.高温热处理共和盆地干热岩力学特性实验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(1):114-121.
 LU Y H, WANG S Y, CHEN M. er al. Experimental study on mechanical properties of hot dry rock.[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1):114-121.
- [78] 廖安杰,张岩,王飞,等.实时高温作用下砂岩的热损伤与能量特征[J].地球科学,2025,50(1):286-298.
 LIAO A J, ZHANG Y, WANG F, et al. Thermal damage and energy characteristics of sandstone under real time high temperature[J]. Earth Science, 2025, 50(1): 286-298.
- [79] 徐小丽, 高峰, 张志镇. 高温后围压对花岗岩变形和强度特性的 影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2246-2252.
 XU X L, GAO F, ZHANG Z Z. Influence of confining pressure on deformation and strength properties of granite after high temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2246-2252.
- [80] WANG X, SHAN T, LIU S, et al. Thermal-damage effects on fracturing evolution of granite under compression-shear loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 133: 104581.
- [81] ZHANG C, LI D, LUO P, et al. Compression-shear failure of thermally treated granite: insights from digital image correlation analysis[J]. Geothermics, 2025, 125: 103157.
- [82] JIANG H, CHEN T, KANG F, et al. Morphological features of fractures developed by direct shearing of intact granites after water

cooling cycles[J]. ACS omega, 2023, 8(15): 13639-13648.

- [83] YANG S Q. Effect of high temperature on the permeability evolution and failure response of granite under triaxial compression[J]. Mechanical Behavior and Damage Fracture Mechanism of Deep Rocks, 2022: 405–437.
- [84] JIN Y, HE C, YAO C, et al. Experimental and numerical simulation study on the evolution of mechanical properties of granite after thermal treatment [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 172: 106464.
- [85] YIN Q, WU J, ZHU C, et al. Shear mechanical responses of sandstone exposed to high temperature under constant normal stiffness boundary conditions[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo–Energy and Geo–Resources, 2021, 7: 1–17.
- [86] WANG S, WANG L, REN B, et al. Mechanical behavior and fracture characteristics of high-temperature sandstone under true triaxial loading conditions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 569–581.
- [87] LIU B, XIE H, HU J, et al. Failure mechanism of hot dry rock under the coupling effect of thermal cycling and direct shear loading path[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 176: 105695.
- [88] 阴伟涛,冯子军. 高温高压下不同结构形式裂缝充填花岗岩热 力学特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2660-2674.
 YIN W T, FENG Z J. Thermal and mechanical properties of fracture-filled granite with different structural forms under high temperature and high pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2660-2674.
- [89] MENG F, YUE Z, ZHOU X, et al. Fracture slip behavior in granite under high-temperature true triaxial loading tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(11): 9669–9694.
- [90] KANT M A, AMMANN J, ROSSI E, et al. Thermal properties of central are granite for temperatures up to 500 °C: Irreversible changes due to thermal crack formation[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(2): 771–776.
- [91] CHEN Y, ZHANG C, ZHAO Z, et al. Shear behavior of artificial and natural granite fractures after heating and water-cooling treatment[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 5429–5449.
- [92] 赵阳升,孟巧荣,康天合,等.显微 CT 试验技术与花岗岩热破裂 特征的细观研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):28-34. ZHAO Y S, MENG Q R, KANG T H, et al. Micro-CT experimental technology and meso-investigation on thermal fracturing characteristics of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 28-34.
- [93] GUO P, BU M, ZHANG P, et al. Mechanical properties and crack propagation behavior of granite after high temperature treatment based on a thermo-mechanical grain-based model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(9): 6411–6435.
- [94] FAN L, GAO J, DU X, et al. Spatial gradient distributions of thermal shock-induced damage to granite[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(5): 917–926.
- [95] PENG L. Analysis of physical and mechanical behaviors and microscopic mineral characteristics of thermally damaged granite[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 14776.
- [96] 孙晋,胡耀青,靳佩桦,等.花岗岩 700℃ 热损伤核磁共振定量表 征[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(6): 121-126. SUN J, HU Y Q, JIN P H, et al. Quantitative characterization of granite thermal damage at 700℃ by nuclear magnetic resonance[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6): 121-126.
- [97] 卜墨华, 郭平业, 金鑫, 等. 高温损伤花岗岩细观结构演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2639-2654. BU M H, GUO P Y, JIN X, er al. Experimental study on evolution of meso-structure of granite subjected to high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(11): 2639-2654.
- [98] WANG T, WANG J, ZHANG X, et al. Experimental investigation on the macro- and micromechanical properties of water-cooled granite at different high temperatures[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 17149.

- [99] LI C, FENG G, ZHANG X, et al. Study on the failure mechanism of high-temperature granite under two cooling modes[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 15630.
- [100] LIANG Q, HUANG G, HUANG J, et al. Effects of different cooling treatments on heated granite: insights from the physical and mechanical characteristics [J]. Materials, 2024, 17(18): 4539.
- [101] 王嘉敏,王守光,李向上,等. 热冲击花岗岩力学响应及损伤特征显微 CT 试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 58-72.
 WANG J M, WANG S G, LI X S, et al. Study on mechanical properties and damage characteristics of granite under thermal shock based on CT scanning[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 58-72.
- [102] 何将福,任成程,何坤,等.循环热冲击花岗岩微观裂隙表征与 渗透特性演化规律[J].煤田地质与勘探,2024,52(12):131-142.
 HE J F, REN C C, HE K, et al. Microscopic fracture characterization and permeability evolutionary patterns of granites under cyclic

thermal shock [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 13.

- [103] ISAKA B L A, RANJITH P G, RATHNAWEERA T D, et al. Quantification of thermally-induced microcracks in granite using X-ray CT imaging and analysis[J]. Geothermics, 2019, 81: 152–167.
- [104] LI W, LI Q, QIAN Y, et al. Structural properties and failure characteristics of granite after thermal treatment and water cooling[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9(1): 171.
- [105] XI Y, XING J, JIANG H, et al. Pore characteristic evolution and damage deterioration of granite subjected to the thermal and cooling treatments combined with the NMR method[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(5): 182.
- [106] LONG K, WU Y, ZHANG R, et al. Variations of physical and mechanical properties of granite with different cooling treatments: an experimental study[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(12): 127105..

Research Progress on Shear Mechanical Properties of Deep High-temperature and High-pressure Rock Mass

RUI Xusheng^{1,2}, YANG Qingshuai^{1,2}, ZHOU Chuanhong^{1,2}, ZHANG Shixiong^{1,2}, ZHANG Hongwei^{1,2}, SONG Jiajun¹, WU Wenling¹

1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Disposal in Coal Mining, Ministry of Emergency Management, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Engineering Research Center of Green and Intelligent Mining for Thick Coal Seam, Ministry of Education, Beijing 100083, China

Abstract: As a clean and renewable dominant resource for power generation in the geothermal field, deep dry hot rock is a premium-quality geothermal rock mass with high-temperature and high-pressure, low porosity and low permeability, it is necessary to carry out seepage-increasing mining through thermal storage water fracturing technology. In the process of hydraulic fracturing and reservoir construction, low-pressure water injection induces shear slip of fracture network or primary fracture, which promotes the fracture to realize dislocation support under its rough surface. It is one of the main technical methods of thermal reservoir permeability enhancement. Its theoretical basis is the shear mechanical properties of high-temperature and high-pressure rock mass. In order to specify the research progress of shear mechanical behavior of high-temperature and high-pressure rock mass, based on the conventional shear mechanics theory and laboratory test methods, we generalize the research status of shear theoretical model of high temperature and pressure rock mass, introduce the progress of shear test equipment of high temperature and pressure rock mass, comprehensively review the shear physical and mechanical propertie, deformation and failure laws of high-temperature and high-pressure rock mass, summarize and discusse the influence mechanism of thermal stress and thermal shock effect on rock microstructure.

Keywords: enhanced geothermal systems; hot dry rock; shear test method; physical and mechanical properties; deformation characteristics.

引用格式: 芮旭升, 杨青帅, 周传洪, 张世雄, 张洪伟, 宋嘉珺, 吴文凌. 深部高温高压岩体剪切力学特性研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(2): 1-13.

RUI Xusheng, YANG Qingshuai, ZHOU Chuanhong, ZHANG Shixiong, ZHANG Hongwei, SONG Jiajun, WU Wenling. Research progress on shear mechanical properties of deep high-temperature and high-pressure rock mass[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(2): 1–13.

投稿网址: http://kcbhyly.xml-journal.net

E-mail: kcbh@chinajoumal.net.cn