

聚焦干热岩压裂的高温岩石力学及热塑性理论研究进展与展望

邢岳堃^{1,2}, 张广清^{2*}

(1. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249)

摘要: 热储高温加剧了岩石力学特性的复杂度, 制约了压裂增渗改造干热岩热储的可控性。围绕干热岩压裂的高温岩石力学特性研究, 主要针对热储高温及温差(流体-岩石)热冲击2种温度作用机制, 总体上发现 $\geq 200^\circ\text{C}$ 热处理与 $\geq 100^\circ\text{C}$ 实时高温, 使压缩条件下的花岗岩强度参数随温度升高而显著降低, 并改变了屈服面初始、临界状态及其间的演化过程, 表明温度改变了岩石塑性力学特性, 另有试验发现实时高温提升致使岩石抗压强度先增后降; 低温热冲击使岩石抗压与抗拉强度近似呈线性降低趋势; 温度提升使岩石断裂韧性先增后减, 临界温度总体介于 $100^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ 范围; 岩石缝尖具有塑性软化特性的断裂过程区在 150°C 以上明显随温度增长, 表明高温加剧了岩石断裂的热塑性; 岩石微结构随温度变化主要呈现为不同类型结合水析出、微裂缝发育及矿物受热膨胀相互挤压3种形式相互竞争, 致使岩石强度及断裂韧性随温度升高出现先增后降的变化趋势。干热岩压裂物模与数模研究表明低温压裂液热冲击会降低起裂压力、诱导起裂提前及扩展滞后、激活弱面、改变缝周应力场并促使分支缝形成, 压裂缝周存在微裂缝区, 其发育受温度影响, 表明高温压裂缝扩展具有热塑性力学特征。基于高温岩石力学特性, 高温岩石热塑性理论得以构建, 针对压裂缝尖“断裂过程区、两侧微裂缝带及压剪塑性区”所构成的热塑性三区, 形成了热塑性本构建模框架, 建立了应力-应变-温度完全耦合的本构关系, 得到了区分静水压力及偏应力且与温度相关的屈服强化及加卸载等准则; 以断裂过程区热塑性软化作为纽带, 融合塑性力学与断裂力学构建了热塑性断裂模型, 得到了7个热塑性断裂参量综合刻画高温岩石断裂; 提出了3个刻画高温压裂缝周微裂缝区的热塑性响应因子, 评价压裂缝的增渗改造效果。后续研究需关注高温岩石边界位移约束下岩石力学特性的热应力依赖性, 在试验与建模层面区分热处理与实时高温2种温度作用机制, 在流-固-热-化学多场耦合框架下提升热塑性理论与压裂模型的融合度, 并进一步探明高温储层压裂多缝的形成与扩展机制。

关键词: 岩石力学; 高温; 压裂; 热塑性; 干热岩

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2026)06-1670-37

第一作者: 邢岳堃(1991-), 现任副教授, 主要从事高温油气-地热储层压裂及裂缝监测方面的研究工作。

E-mail: xingyuekun@cumt.edu.cn

***通信作者:** 张广清(1975-), 现任教授, 主要从事石油工程岩石力学方面的研究工作。E-mail: zhangguangqing@cup.edu.cn

High-temperature rock mechanics and thermoplastic theory with emphasis on hot dry rock fracturing: advances and perspectives

XING Yuekun^{1,2}, ZHANG Guangqing^{2*}

(1. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

收稿日期: 2025-05-19; **修回日期:** 2025-12-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52274013); 中国矿业大学煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室自主研究课题资助项目(SKLCRSM24X004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2024ZDPYYQ1005)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52274013), Independent Research Project of State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology (Grant No. SKLCRSM24X004) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2024ZDPYYQ1005)

Abstract: High temperatures in geothermal reservoirs increase the complexity of rock mechanical properties, constraining the effectiveness of hydraulic fracturing stimulation for enhanced permeability in hot dry rock (HDR). Research on the high-temperature rock mechanics relevant to HDR fracturing has primarily focused on two thermal mechanisms: intrinsic high-temperature environments and fluid-rock thermal shocks. Studies have found that, in general, heat treatment at $\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ and real-time high temperatures of $\geq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ significantly reduce the strength parameters of granite under compression, and alter the initial and critical states of the yield surface as well as its evolutionary process between them. This indicates that temperature alters the plastic mechanical properties of rock. Other experiments observed that increasing real-time temperature initially increases and then decreases the rock compressive strength. Thermal shock from lower temperatures leads to an approximately linear decrease in both compressive and tensile strength. Temperature increase causes the rock fracture toughness to first increase and then decrease, with the critical transition temperature generally lying between $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. The fracture process zone (FPZ) at the rock crack tip, characterized by plastic softening, notably expands with increasing temperature above $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicating enhanced rock thermoplasticity at high temperatures. Changes in rock microstructure with temperature primarily manifest as three competing mechanisms: the release of different types of bound water, the development of microcracks, and thermal expansion-induced mutual compaction of minerals. These competing mechanisms cause the observed trend of initial increase followed by decrease in rock strength and fracture toughness with rising temperature. Physical and numerical modeling of HDR fracturing indicates that thermal shock from cooler fracturing fluid reduces fracture initiation pressure, induces earlier initiation and delayed propagation of the hydraulic fracture, activates weak planes, alters the stress field around the fracture, and promotes the formation of branch fractures. A temperature-dependent microcrack zone exists around the hydraulic fracture, suggesting that the propagation of hydraulic fracture at high temperatures exhibits thermoplastic mechanical characteristics. Based on the above high-temperature mechanical properties, a theory of rock thermoplasticity has been developed. Focusing on the three thermoplastic zones around the hydraulic fracture—comprising the fracture process zone, the microcrack zone, and the compressive-shear plastic zone—a framework for thermoplastic constitutive modeling has been established. This includes fully coupled stress-strain-temperature constitutive relations and temperature-dependent yield/hardening/unloading criteria that distinguish between hydrostatic pressure and deviatoric stress. By linking the thermoplastic softening in the FPZ, a thermoplastic fracture model integrating plastic and fracture mechanics was developed, characterized by seven parameters that comprehensively describe high-temperature rock fracture. Three thermoplastic response factors were proposed to characterize the microcrack zone around a high-temperature hydraulic fracture, to evaluate the permeability enhancement effectiveness through fracturing. Future research should focus on the dependence of rock mechanical properties on thermal stress under boundary displacement constraints and should distinguish, both experimentally and in modeling, between the effects of heat treatment and real-time high temperature on rock mechanical behavior. It is also necessary to enhance the integration of thermoplastic theory with fracturing models within a coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical (THMC) framework and to further elucidate the mechanisms governing the formation and propagation of multiple fractures during HDR fracturing.

Key words: rock mechanics; high temperatures; hydraulic fracturing; thermoplastic; hot dry rock

First author: XING Yuekun (1991 –), associate professor, is engaged in fracturing and fracture monitoring of high-temperature oil-gas and geothermal reservoirs. E-mail: xingyuekun@cumt.edu.cn

***Corresponding author:** ZHANG Guangqing (1975 –), professor, is engaged in petroleum related rock mechanics. E-mail: zhangguangqing@cup.edu.cn

1 引 言

干热岩地热是绿色、低碳且储量巨大的接替能

源, 其高效开采有望助力我国实现能源独立。干热岩是不含或仅含少量流体, 温度通常高于 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其热能在当前技术及经济条件下可以利用的岩体^[1-3], 主要为以花岗岩为主的变质岩或结晶岩类, 还包括碳

酸盐岩与致密砂岩^[2, 4]。干热岩地热储量巨大、低碳、清洁、稳定且可持续,在“经济高速发展对传统化石能源需求持续提升”但“传统化石能源剩余储量减少且其产能受制于双碳目标”的背景下,干热岩地热具有接替能源潜力,已在全世界范围内得到了广泛的关注^[2, 5-9]。我国埋深 3~10 km 深的干热岩地热达 860 亿吨标准煤,高效开采干热岩地热有望支撑我国同步实现“双碳”目标与能源独立^[1-2, 5-6]。

压裂是干热岩地热高效开采的核心技术,高温岩石力学特性是影响压裂裂缝扩展的关键因素。目前,以压裂(高温流体致裂岩石并驱动裂缝扩展)增渗为关键技术的增强型地热系统(enhanced geothermal systems, EGS)是开采干热岩地热的主要方式,通过压裂在干热岩储层中形成人工裂缝(网络),可有效提升采热流体与储层热交换效率^[2, 10-13]。美国于 1973 年最早在 Fenton Hill 钻成干热岩井并进行储层压裂,初步证实了压裂造缝沟通注抽井的可行性,之后 50 年期间,美国、英国、德国、法国、澳大利亚、瑞士、瑞典、日本、韩国等相继探索了干热岩地热的 EGS 开发模式^[3, 14-17]。我国干热岩地热勘探与开发主要于 2012 年后快速发展,经勘探已在青海共和盆地、东南沿海(广东惠州)、雷州半岛、苏北盆地、冀东平原、山西大同盆地等发现了潜力较大的干热岩地热,其中,青海共和盆地干热岩勘探井井底温度达 236 °C,并已开展了热储压裂改造工程试验,实现了井间循环连通^[5, 16, 18]。

至今全球 EGS 工程项目已超过 60 项,干热岩热储现场压裂改造目前仍以水力剪切压裂为主^[2-3, 14, 19],泵注方式除传统连续泵注方式外还进行了疲劳水力压裂实践^[20-25],2022 年以来水平井分段多簇压裂改造干热岩的效果显现^[26-28]。自早期干热岩 EGS 项目实施以来,水力剪切压裂一直是增强储层渗透性的关键工艺方法,该方法以低注液速率与低于最小水平地应力的泵压向干热岩储层长期注入压裂液,使压裂液激活天然裂隙,在地应力作用下形成扩容张开的剪切裂缝带^[2, 29];微震监测结果表明,压裂液激活断层及断层周围的天然裂缝是水力剪切裂缝带扩展的主要影响因素^[3, 30-31];水力剪切裂缝带的扩展不符合线弹性断裂理论,由于对水力剪切裂缝带扩展规律的认识不够深入,水力剪切裂缝沿断层扩展的趋势难以抑制,导致地热开采过程中水耗严重,甚至因断层滑移引发了严重的地震^[32-34]。为兼顾造缝网及抑制压裂诱发地震,循环泵注等变载荷压裂方法被提出并实践,通过循环或脉冲泵注使

缝内压力周期循环,从而使缝尖及缝周岩石承受疲劳载荷,经实践该方法可有效增大缝周微裂缝区尺寸,同时降低了岩石破裂压力与微震震级^[20-21]。为了突破干热岩热储选址对天然裂缝的依赖性并提升形成压裂缝网的可控性,采用水平井分段多簇压裂技术(已广泛应用于非常规油气)改造干热岩得到了关注。2022~2024 年,美国内华达州与犹他州的干热岩地热开发项目应用了水平分段多簇压裂技术,注采井间循环水流量及水温分别达 63~120 kg/s 与 169 °C~187 °C,达到了预期效果^[26-28]。但总体上,干热岩热储压裂缝网形成困难,注采井间连通性差,主要受制于 4 个方面:岩石强度大,起裂压力高;压裂裂缝单一且形成缝网难,换热效率低并引发热短路;压裂裂缝延伸难控制,注采井沟通困难;压裂及注采过程中发生地震,进而制约了干热岩地热的高效开采。目前尚未形成一种“可复制”的干热岩高效造储方法^[2, 34]。“裂缝在高温岩层中扩展”是干热岩压裂的突出特征,岩石力学特性是决定(压裂)裂缝扩展规律的关键因素^[35-36],而干热岩所处实时环境温度为 150 °C 以上时,其力学特性将逐步变化且愈发显著^[37-38],加剧了压裂缝扩展的复杂性。因此,确定高温岩石力学特性是提升干热岩压裂效果的重要基础。

干热岩高温力学响应特性及其压裂裂缝扩展规律研究近年来受到关注。目前干热岩高温力学响应特性研究以花岗岩为主要岩性,总体围绕高温热处理、高温环境及温差热冲击(低温压裂液接触高温岩石)3 种与干热岩压裂相关的温度作用机制展开。

抗压与抗拉力学特性研究集中于揭示花岗岩抗压强度、抗拉强度及弹性参数随温度变化规律。研究表明,高温热处理与温差冲击作用下岩石力学参数呈现一致性劣化趋势,随温度升高强度与弹性参数单调下降^[17, 38-47]。然而,实时高温环境下花岗岩的压缩力学行为更为复杂,因受试验技术限制(尤其是高温三轴压缩),相关研究仍较有限^[37, 48-55];其中,高温(真)三轴压缩试验系统的研制^[37, 49-52],支撑了高温花岗岩三轴抗压力学特性研究。高温环境中花岗岩压缩力学特性研究既形成共识又存在差异:研究一致认为当温度超过特定阈值后,热致微观损伤将显著劣化花岗岩,表现为抗压强度与弹性模量降低^[37, 48-49, 53, 55],破坏模式由脆性向延性转变^[51, 54],且高温会增强岩石的塑性力学行为^[37];然而,在 300 °C 以内,不同研究对强度变化趋势存在分歧,主

要表现为“先增后降”^[48-53, 55]与“单调下降”^[37, 49]两种趋势, 且拐点温度不尽相同, 基于 W. T. Yin 等^[54]的研究可发现该差异主要源于不同花岗岩微观结构和矿物成分组构所产生的热敏感性差异。X. Ma 等^[51-52]以高温真三轴压缩试验研究为特色, 发现岩石力学响应受中间主应力与温度的交互影响。热力损伤模型可定量刻画高温热处理损伤岩石后的应力-应变本构关系^[56-59]。然而, 对于高温环境中岩石的塑性力学特性, 现有研究尚缺乏充分的模型描述。

高温岩石 I 型断裂研究关注高温岩石断裂韧性演变与断裂过程区发育两类断裂特征。实时高温不断提升的条件下, 岩石 I 型断裂韧性普遍呈先增后降的变化规律^[60-66]; 但不同研究所确定的断裂韧性升降拐点温度和变化幅度存在差异, 这与温度作用方式、矿物粒径及岩性密切相关, P. G. Meredith 与 B. K. Atkinson^[62]试验研究表明, 大粒径岩石在高温中具有更高的断裂韧性。温度显著影响断裂过程区的发育, S. T. Miao 等^[67-69]发现高于 100 °C 的温度会促进断裂过程区扩展并增强其塑性力学行为, 表明高温加剧了花岗岩的塑性断裂效应。然而, 针对高温断裂过程区的理论模型仍较为缺乏。

高温引起的花岗岩微观结构变化是宏观力学行为演化的根本原因。微裂缝发育、结合水析出与矿物晶体热变形共同影响岩石力学参数^[44, 50, 70-77]: 微裂缝发育导致岩石劣化^[70-75]; 200 °C 以内, 附着水与弱结合水析出提升弱面摩擦, 增强强度与断裂韧性, 超过 200 °C 后, 强结合水与结构水析出则显著劣化岩石并引起强度及断裂韧性下降^[44, 76]; 实时高温下矿物热膨胀产生压实增韧效应^[76-77]。上述机制的竞争作用共同导致岩石强度与断裂参数呈现先升后降的变化趋势。

高温花岗岩压裂裂缝扩展规律研究主要包括物理模拟与数值模拟 2 种方法。高温花岗岩压裂物理模拟研究形成以下共识: (1) W. G. P. Kumari 等^[78]与 Y. K. Xing 等^[79]分别通过 CT 扫描下的伪三轴压裂及声发射监测下的真三轴压裂试验, 揭示了水力裂缝周围微裂缝带的存在, 其继承了断裂过程区的热塑性力学特性, 影响裂缝扩展阻力与改造体积; (2) 诸如液氮^[80-82]、超临界 CO₂^[83]及水^[84-85]的压裂介质与高温花岗岩接触产生的温差热冲击可显著降低破裂压力, 其中液氮超低温热冲击以及超临界 CO₂ 低黏易进入热诱导微裂缝的特性有效提升了裂缝复杂度; (3) Z. Zhou 等^[84]通过高温真三轴压裂物

模试验发现, 高温花岗岩中的弱面会诱导水力裂缝转向并沿弱面扩展的特性。数值模拟研究则进一步揭示了液-岩温差热冲击具有促进分支裂缝形成与弱面激活^[85-90]、降低起裂压力^[91]以及改变压裂缝周应力场^[86, 92]等效应。当前高温压裂物模研究“重起裂、轻扩展”, 亟需强化对高温压裂缝扩展规律的刻画, 并深化压裂模型, 促进高温压裂数模及现场工程的优化。

围绕高温加剧干热岩压剪与断裂塑性行为这一重要特性, Y. K. Xing 等^[93]针对“压裂缝尖断裂过程区、缝侧微裂缝带及压剪塑性区”(热塑性三区), 提出了热塑性本构建模框架, 建立了高温岩石压剪热塑性本构模型^[93-94]; 采用融合塑性力学与断裂力学的建模方法, 构建了热塑性断裂模型^[95]; 聚焦高温压裂缝周微裂缝区引入 3 个热塑性响应因子^[79], 综合评价压裂裂缝的加深改造效果。

本文将系统论述干热岩压裂中高温岩石力学特性与裂缝扩展规律的研究进展, 重点阐述与压裂相关的高温岩石热塑性理论, 并基于当前研究基础, 探讨高温岩石力学对干热岩地热工程的启示, 以及该研究领域面临的关键问题与发展方向。

2 花岗岩型干热岩力学响应特性研究

确定与温度相关的岩石力学响应特性是揭示干热岩水力裂缝扩展规律的基础。国内外学者开展了大量的干热岩高温力学特征研究, 以花岗岩为主要岩性, 主要包括与温度相关的花岗岩压缩、拉伸及断裂力学特性研究, 以室内试验为主要研究手段, 温度区间多集中于 150 °C~650 °C, 并聚焦高温作用后、实时高温环境及温降冲击(瞬间降温热冲击与循环温降)3 种温度作用模式, 其中, 高温环境中的岩石力学特性研究相对有限。本节将聚焦以花岗岩为主要岩性的干热岩, 论述干热岩高温力学响应特性。

2.1 高温花岗岩的抗压与抗拉力学特性

多数研究聚焦于高温作用后花岗岩压拉力学参数的试验测试, 研究结果表明, 以花岗岩为主的干热岩弹性模量、抗压强度以及抗拉强度总体上随着岩样温度的升高呈非线性加速下降趋势^[38-45]; 部分试验结果表明, 在 200 °C 内温度的升高会提升岩石抗压强度。针对青海共和盆地干热岩, 三轴压缩试验结果表明, 印支期花岗岩的莫尔-库仑临界屈服面及屈服参数(黏聚力和内摩擦角)对 200 °C 以上的

高温具有显著的温度敏感性^[39, 96]，随着温度的升高，黏聚力升高但内摩擦角降低，表明高温热处理会改变花岗岩的塑性力学特性。此外，高温也加剧了花岗岩的蠕变力学特性^[97]。

实时高温环境中花岗岩力学特性的试验研究(尤其是三轴压缩)相对有限，主要受制于试验技术，典型研究已归纳于表 1^[37, 48-55]，加载条件包括单轴、伪三轴与真三轴 3 种方式。尽管加载方式不

表 1 实时高温中花岗岩抗压力学特性典型试验测试汇总^[37, 48-55]

Table 1 Summary of typical experimental tests on compressive mechanical properties of granite under real-time high temperature conditions^[37, 48-55]

文献来源 (literature source)	岩石类型 (rock type)	矿物成分、粒径 (mineral composition, particle size)	物理力学参数 (physico-mechanical parameters)	测试温度(test temperature)	试样类型 及尺寸(sample type and size)	加载条件 (loading conditions)	测试结果 (test results)
S. S. Shao 等 ^[48]	花岗岩 (澳大利亚)	成分主要为岩浆石榴石、堇青石和黑云母； 粒径：大多数 1~200 μm，少数>300 μm	-	23 ℃~1 100 ℃ 加热速率： 5 ℃/min	圆柱体 直径：22.5 mm 长度：45 mm	单轴压缩，轴向位移 加载至破坏，速率 0.1 mm/min	抗压强度及弹性模量 以 200 ℃为界先增后 降，声发射表明岩样裂 缝萌生及损伤阈值随 温度升高而降低，高温 增强裂缝稳态扩展
Z. B. Liu 等 ^[49]	花岗岩 (青海共和)	长石、石英和黑云母超 过 90%	密度：2.79 g/cm ³ ； 纵波波速：5 768 m/s	室温~240 ℃	长方体 50 mm×50 mm×100 mm	真三轴加载，侧向最 大围压：40, 60, 75 MPa，侧向最小围 压：5, 10, 30 MPa， 轴向以 10 ⁻⁶ /s 应变 率加载至破坏	室温升高至 240 ℃， 抗压强度降低超过 20%，脆性降低
H. Y. Zhou 等 ^[37]	花岗岩(贡 觉)	长石 (50%)、石 英 (35%)、云母(10%)和绿 泥石(5%)	密度：2.68~2.72 g/cm ³ ，纵波波速： 5 000~6 000 m/s	室温~180 ℃	圆柱体 直径：50 mm 长度：100 mm	侧向围压：0, 2, 15, 30, 40 MPa，轴向位 移加载至破坏，速率 0.1 mm/min	室温升高至 180 ℃， 起裂应力、抗压强度 与弹性模量降低，围压 主控变形与破裂形态
T. Meng 等 ^[50]	花岗岩(甘 肃北山)	石英(63.1%)、钾长石 (16.1%)、钠长石 (12.2%)与黑云母 (8.6%)	密度：2.63 g/cm ³ ； 孔隙度：0.44%；单 轴抗压强度：162.9 MPa，抗拉强度： 8.6 MPa	25 ℃~800 ℃	圆柱体 直径：10 mm 长度：5 mm	静水压力 25 MPa 及 渗透压力 0.6 MPa 条 件下，对试样进行加 热；加热后通过微型 CT 刻画不同温度下 试样孔裂隙结构	花岗岩微孔裂隙随 温度升高(室温至 800 ℃)而逐步提升， 孔隙度由 0.45%提升 至 16.45%
X. Ma 等 ^[51]	花岗岩(湖 北)	长石 (66.52%)、石 英 (19.87%)、黑 云 母 (12.32%)与斜绿泥石 (1.29%)	密度：2.768 g/cm ³ ， 热 导 率：2.78 W/(m·K)，纵波波 速：4 179 m/s	室温~400 ℃	长方体 50 mm×50 mm×100 mm	真三轴加载，侧向两 向围压相等：0, 20, 40, 60 MPa；轴向位 移加载至破坏，速率 0.01 mm/min	岩石脆性特征随温度 升高而降低，黑云母 韧性增强是主要原因
X. Ma 等 ^[52]	花岗岩(湖 北)	长石 (77%)，石 英 (22%)；粒径：大多 数 0.2~1 mm，少数>2 mm	-	室温~400 ℃	长方体 50 mm×50 mm×100 mm	真三轴加载，中间主 应力：20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 MPa，最小主应力： 20, 40, 60 MPa，轴 向位移加载至破坏， 速率 0.01 mm/min	随着温度的升高，在 高、低中间主应力条 件下裂缝起裂应力与 损伤应力随温度升高 分别上升与降低；温 度和中间主应力升 高，由剪切向剪切- 拉伸复合模式演变
许锡昌和刘 泉声 ^[53]	花岗岩(长 江三峡坝 区)	石英、长石、角闪 石、黑云母	密度：3.36 g/cm ³ ； 纵波波速：5 780 m/s；横波波速： 3 650 m/s	20 ℃~600 ℃	圆柱体 直径：20 mm 长度：40 mm	单轴压缩，位移控制 加载，速率 0.05 mm/min	弹性模量与单轴抗压 强度以 75 ℃与 200 ℃为门限，随温 度升高先增后降
W. T. Yin 等 ^[54]	细粒花岗 岩(山东平 邑)、粗粒花 岗岩(山西)	细粒花岗岩：长石 (43%)、石英(28%)、伊 利石(25%)、方解石(1%)、 菱铁矿(1%)、其他(2%)， 平均粒径：0.7~1.5 mm； 粗粒花岗岩：角闪石 (21%)、斜长石(44%)、石 英(23%)、云母(10%)、绿 泥石(2%)	细粒花岗岩：弹性 模量 89~117 GPa， 热膨胀系数(6.5~ 11)×10 ⁻⁶ /℃；粗粒 花岗岩：弹性模量 60~117 GPa，热膨 胀系数：(3~11)× 10 ⁻⁶ /℃	100 ℃~400 ℃	圆柱体 直径：50 mm 长度：100 mm	轴向与侧向围压先 加载至 4 MPa，到达 设定温度并恒温处 理后，以 2 MPa 为增 量将轴压加载至 30 MPa，测弹性参数； 400 ℃且静水压力 25 MPa 条件下，提 升轴压至试样破裂	温度升高，粗粒花岗 岩热膨胀系数提升更 快，最高达细粒花岗 岩的 1.52 倍；粗粒花 岗岩弹塑性转变的应 变出现更早，高温下 花岗岩热变形及劣化 程度更高
张洪伟等 ^[55]	花岗岩 (山东)	石英 (33%)、钾长石 (32%)、斜长石(35%)	-	25 ℃~500 ℃	圆柱体 直径：50 mm 长度：100 mm	单轴压缩位移控制 加载，加载速率 0.5 mm/min	以 200 ℃为界抗压 强度随温度升高降低， 超过 200 ℃降低速度 增速，超过 300 ℃降 速变缓；弹性模量随 温度升高下降

同,但各研究在核心规律上形成了明确共识:当温度升高超过特定门限值后(抗压强度与弹性模量的门限温度多分别介于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及 $75\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$),高温诱发的微观损伤会显著劣化花岗岩,导致花岗岩抗压强度及弹性模量降低^[37, 48-49, 53, 55]以及破坏模式由脆性向延性转变^[51, 54];同时高温改变了花岗岩的塑性力学特性, H. Y. Zhou 等^[37]所开展的实时高温环境中花岗岩三轴压缩应力-应变曲线表明,当花岗岩温度超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,初始及临界屈服应力均显著降低(见图 1 与 2, 图 2 中, T_0 为给定初始温度),表明屈服面在主应力空间中的初始与临界状态(包括大小与位置)以及从初始到临界状态的屈服面塑性演化过程均受温度影响,上述力学特性的变化归因于高温促使花岗岩微裂缝密度的增加^[37, 50]。然而,在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,不同研究所刻画的岩石抗压强度随温度演变规律存在差异,主要表现为“先增后降”^[48, 53, 55]与“单调下降”^[37, 49]两种趋势,且前者所对应的门限温度亦不尽相同,该差异主要源于不同花岗岩在微观结构和矿物成分上的差异,导致其温度敏感性各不相同:例如 W. T.

Yin 等^[54]研究发现,温度升高,粗粒花岗岩相较细粒花岗岩的热膨胀系数提升更快,高温下花岗岩热变形及劣化程度更高,粗粒花岗岩弹塑性转变的应变出现更早;另有 X. Ma 等^[51]研究发现高温环境致使黑云母增韧,促使花岗岩在初始劣化阶段强度提升,可推断该效应随黑云母含量增加而增强。此外,针对中间主应力与温度交互作用对岩石力学响应的影响, X. Ma 等^[51-52]通过开展花岗岩的高温真三轴压缩试验,发现中间主应力增加会导致花岗岩在峰后阶段沿中间主应力方向的变形由膨胀转变为压缩,中间主应力升高对抗压强度的提升速率受温度调控,温度和中间主应力升高致使岩石由剪切破裂向剪切-拉伸复合模式转变。

干热岩压裂中,低温流体接触高温花岗岩时,流体与岩石之间的温差将对岩石产生热冲击,致使岩石内部微裂纹萌生、发育和聚并^[46, 98-100],加剧岩石的损伤;国内外学者集中于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围,开展了大量温差热冲击影响岩石力学特性的研究,研究表明,随着加热温度的升高,温差热冲击加剧,岩石损伤增强,抗压与抗拉强度的归一

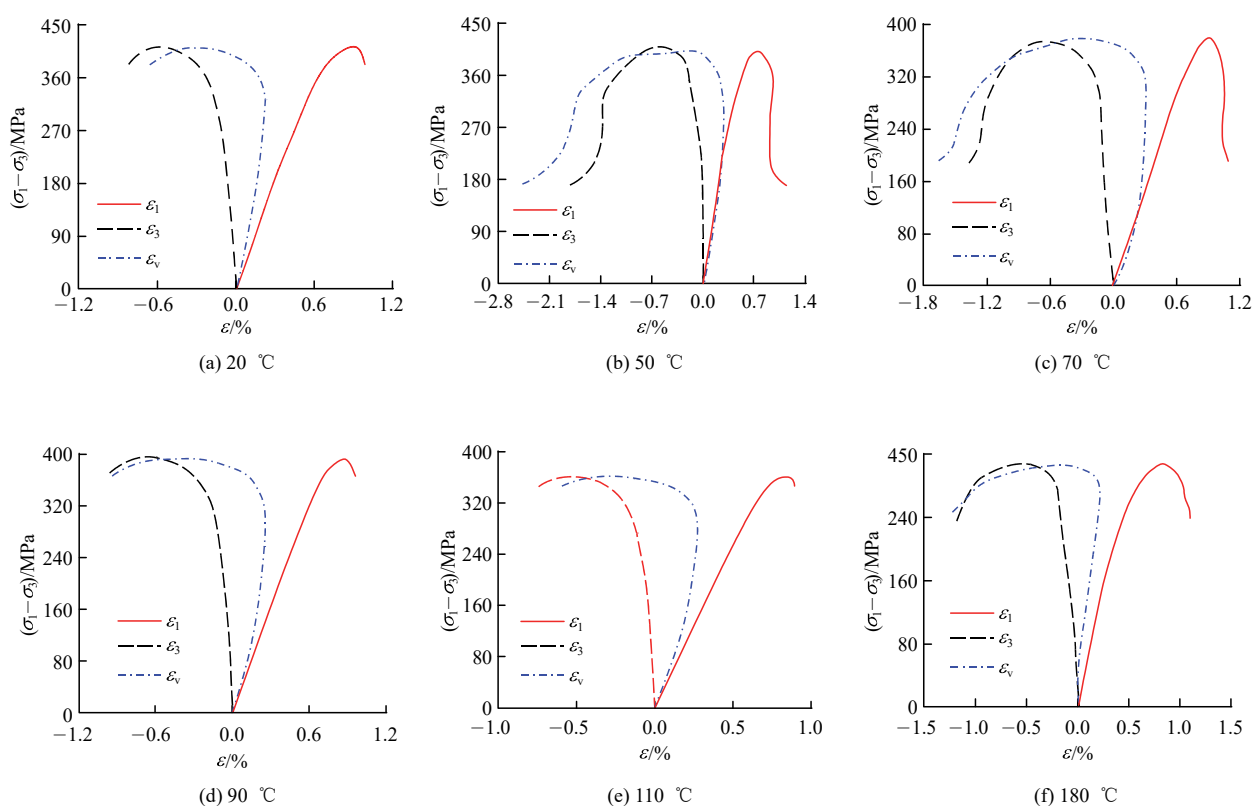


图 1 高温环境中花岗岩的三轴压缩应力应变曲线(修改自 H. Y. Zhou 等^[37])

Fig.1 Triaxial compression stress-strain curves of granite in high-temperature environments (modified from H. Y. Zhou, et al^[37])

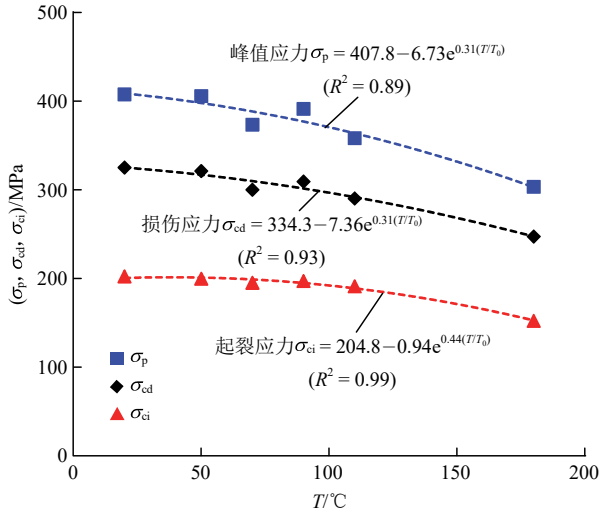


图2 高温环境中花岗岩特征强度随温度演变曲线(修改自 H. Y. Zhou 等^[37])

Fig.2 Evolution of granite characteristic strength with real-time temperature (modified from H. Y. Zhou, et al^[37])

化值呈线性降低趋势(见图 3)^[17, 46-47, 101-128]。在地热开采过程中,由于持续的注采循环,干热岩持续经历热循环作用,产生单次损伤程度低于压裂过程的循环热冲击,从而循环弱化岩石;热循环弱化花岗岩仅集中于前几个循环,且随着加热温度和围压的升高,热冲击作用下花岗岩的压缩破坏模式由轴向劈裂破坏转变为剪切破坏和多重剪切破坏^[17, 129]。

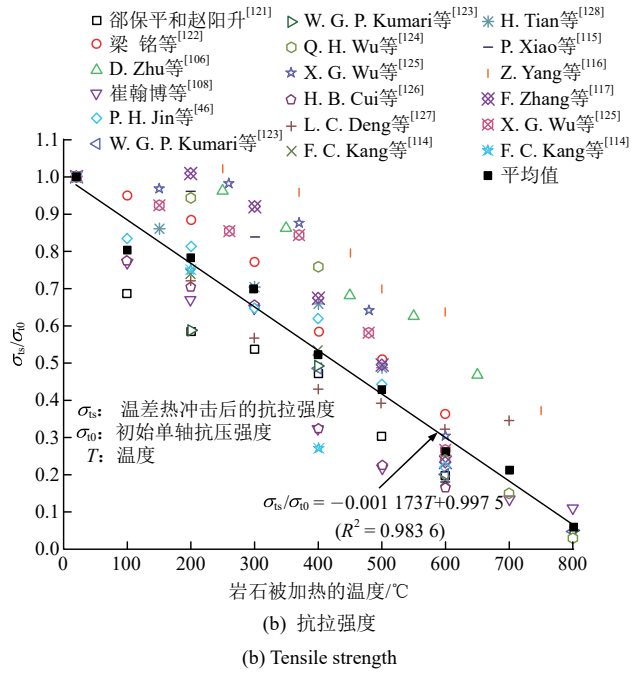
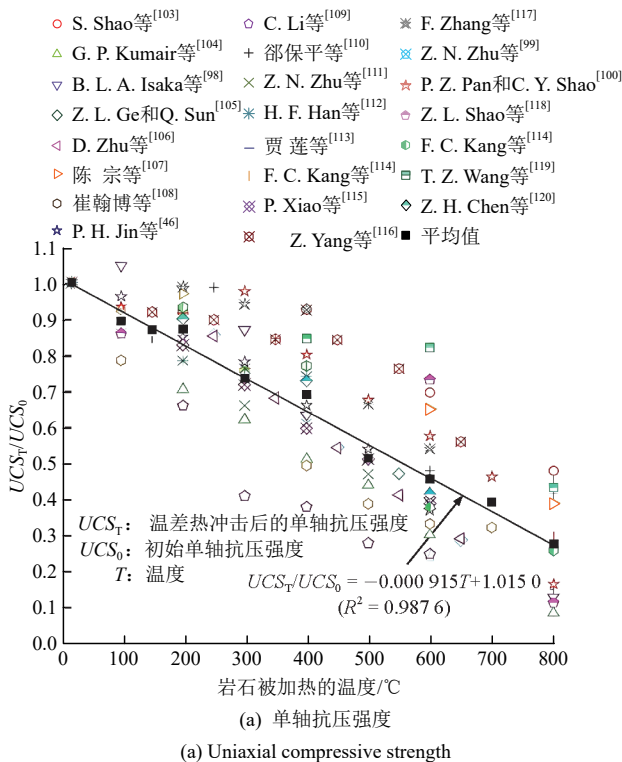


图3 温差热冲击下花岗岩抗压强度和抗拉强度的温度变化特征(修改自 Z. N. Zhu 等^[17])

Fig.3 Temperature-dependent variation of compressive and tensile strengths of granite under temperature-difference-induced thermal shock (modified from Z. N. Zhu, et al^[17])

2.2 高温花岗岩的断裂特性

高温花岗岩断裂是干热岩压裂裂缝扩展的突出力学行为。高温岩石断裂特征研究以试验为主,主要考虑高温热处理及实时高温 2 种温度作用方式,由于高温环境下岩石断裂试验的实施与监测难度高,其断裂试验研究较为有限,表 2 汇总了以实时高温为主的典型 I 型岩石断裂试验信息,主要包括三点弯、双扭以及人字形切槽短棒断裂 3 种试验方法,关注高温岩石断裂韧性演变与断裂过程区发育 2 类断裂特征。

表 2 中所述研究一致发现,岩石 I 型断裂韧性(线弹性参量)在高温下并非单调变化,而是普遍呈现随温度升高“先增后降”的变化规律^[61-66](见图 4),且拐点温度主要介于 100 °C~200 °C 范围,表明温度升高致使岩石的抗断裂能力由“强化”到“劣化”的转变,该变化趋势归因于微裂缝增多弱化岩石、附着水-弱结合水析出提升弱面摩擦以及矿物膨胀变形的相互作用机制^[44, 50, 70-77],并于下文进行讨论。然而,不同研究所确定的断裂韧性升降拐点温度和变化幅度存在明显差异,这主要与岩石的高温作用方式、矿物颗粒尺寸及岩性有关, Y. F. Hu 等^[63]研究发现实时高温环境中矿物膨胀压实效应致使断裂韧性的拐点温度高于热处理条件, P. G. Meredith

表 2 温度作用下岩石 I 型断裂韧性及缝尖断裂过程区发育特征的典型试验测试汇总表
Table 2 Summary of typical experimental tests on rock mode I fracture toughness and development characteristics of fracture process zone at crack tip under thermal effects

测试参量 (test parameters)	文献来源 (literature source)	岩石类型 (rock type)	矿物成分、粒径 (mineral composition, particle size)	物理力学参数 (physico-mechanical parameters)	测试温度(test temperature)	断裂试样类型及尺寸(types and dimensions of fractured specimens)	加载速率 (loading rate)	测试结果 (test results)
断裂韧性	P. G. Meredith 和 B. K. Atkinson ^[62] ; B. K. Atkinson ^[61]	花岗岩 (Westerly)	矿物成分: 石英(27%)、正长石(36%)、斜长石(30%)、片状硅酸盐(6%)和其他(1%); 平均粒径: 0.75 mm	孔隙度: 1%	实时高温环境及高温热处理: 20 ℃~400 ℃	双扭断裂试样, 尺寸: 110 mm×45 mm×3 mm, 切槽深度 30%试样厚度	位移加载 10 mm/min	断裂韧性先增后降, 高温环境与高温热处理所对应的拐点温度均为 100 ℃, 高温环境中断裂韧性拐点值更高
	王靖涛等 ^[66]	花岗岩 (湖北随县)	矿物成分: 更长石和微斜条纹长石(80%~85%)、石英(10%~15%)、黑云母(<2%)和角闪石(1%); 部分长石和石英含有微裂纹	孔隙度: 1.88%; 岩石力学参数: 弹性模量 37.2 GPa, 泊松比 0.304, 单轴抗压强度 123.5 MPa, 抗拉强度 3.0 MPa	实时高温环境: 20 ℃~300 ℃	三点弯断裂试样, 尺寸: 厚度 40 mm, 高度 40 mm, 跨距 160 mm, 预制缝长与高度比 0.375	位移加载 0.05 mm/min	以 200 ℃为界断裂韧性先增后减
	Y. F. Hu 等 ^[63]	花岗岩 (河南驻马店店)	矿物成分: 斜长石(47%)、石英(20%)、黑云母(18%)和碱性长石(15%)	密度: 2651.4 kg/m ³ , 渗透率 3.4×10 ⁻¹⁸ m ² ; 岩石力学参数: 抗拉强度 6.5 MPa, 抗压强度 180.6 MPa, 弹性模量 16.7 GPa	实时高温环境及高温热处理: 室温~600 ℃	半圆形三点弯断裂试样, 尺寸: 半径 25 mm, 预制缝长 12.5 mm, 厚度 20 mm, 跨距 35 mm	位移加载 0.002 mm/s	断裂韧性先增后降, 高温环境与高温热处理所对应的拐点温度为 200 ℃与 100 ℃, 高温环境中断裂韧性拐点值更高
	M. R. Balme 等 ^[64]	玄武岩 (产地: 冰岛)	矿物成分: 斜长石(59%~61%)、斜辉石(26%~30%)、橄榄石(6%~8%)与磁铁矿(3%~4%); 粒径: <100 μm	孔隙度: 2%; 密度: 2.95±0.02 g/cm ³	实时高温环境: 30 ℃~600 ℃; 试样处于 1 MPa 围压环境	人字形切槽短棒断裂试样; 直径: 60 mm	-	以 150 ℃为界断裂韧性先增后减
	P. G. Meredith 和 B. K. Atkinson ^[62]	黑色辉长岩	矿物成分: 斜长石(50%)、单斜辉石(38%)、磁铁矿(8%)与长石/石英共晶(3%); 粒径: 试样 A(0.5~1.2 mm), 试样 B(0.4~1.0 mm)	孔隙度: 1%	实时高温环境: 20 ℃~400 ℃	双扭断裂试样, 尺寸: 110 mm×45 mm×3 mm, 切槽深度 30%试样厚度	位移加载 10 mm/min	以 100 ℃为界断裂韧性先增后减, 大粒径岩样断裂韧性更高
	Q. H. Rao 等 ^[65]	砂岩	-	岩石力学参数: 弹性模量 10.7 GPa, 泊松比 0.27, 单轴抗压强度 66 MPa, 抗拉强度 2.2 MPa	实时高温环境: 20 ℃~300 ℃	三点弯断裂试样, 尺寸: 长度 250 mm, 厚度与高度: 50 mm, 预制缝长 25 mm	位移加载 5 μm/s	以 200 ℃为界断裂韧性先增后减
断裂过程区	S. T. Miao 等 ^[67]	花岗岩 (甘肃北山)	矿物成分: 石英(35%)、钾长石(30%)、斜长石(20%)、黑云母(5%)和白云母(10%); 粒径: 0.25~4.4 mm	岩石力学参数: 弹性模量 22 GPa, 单轴抗压强度 120 MPa	高温热处理: 25 ℃~800 ℃	半圆形三点弯断裂试样, 尺寸: 半径 75 mm, 预制缝长 28 mm, 厚度 20 mm, 跨距 90 mm	缝口张开位移加载 0.000 2 mm/s	断裂过程区长度随温度的升高而递增, 200 ℃以上增长速率提升
	J. W. Wu 等 ^[68]	花岗岩 (山东平邑)	-	岩石力学参数: 单轴抗压强度 160 MPa, 抗拉强度 17.9 MPa	高温热处理: 20 ℃~900 ℃	三点弯断裂试样, 尺寸: 厚度 20 mm, 高度 40 mm, 长度 180 mm, 跨距 160 mm, 预制缝长 12 mm	位移加载 0.05 mm/min	断裂过程区长度随温度的升高而递增, 200 ℃以内增长速率明显, 300 ℃以后增长速率变缓
	Y. K. Xing 等 ^[69]	花岗岩 (福建)	-	岩石力学参数: 单轴抗压强度 120.1~172.7 MPa, 弹性模量 64 GPa	低温热冲击处理: 240 ℃试样置入水浴经历 0 ℃~240 ℃温差冲击	三点弯断裂试样, 尺寸: 厚度 10 mm, 高度 80 mm, 长度 120 mm, 跨距 100 mm, 预制缝长 10 mm	位移加载 0.04 mm/min	温差为 140 ℃以上, 断裂过程区长度随温差提升而显著降低

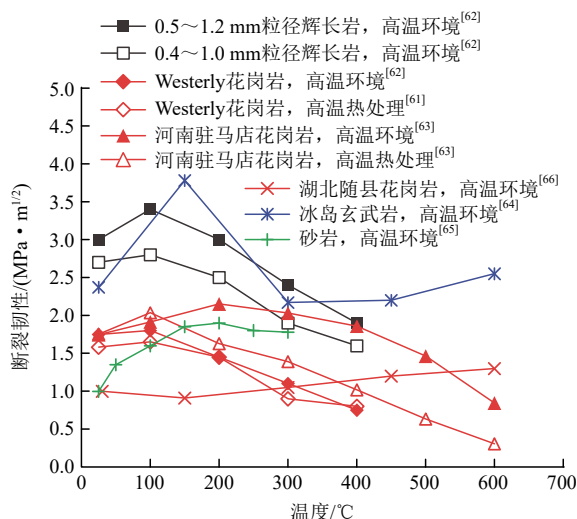


图4 岩石断裂韧性随温度演化特性

Fig.4 Temperature-dependent evolution characteristics of rock fracture toughness

和 B. K. Atkinson^[62]的试验研究表明,大矿物粒径岩石在高温中的断裂韧性高于小矿物粒径岩石。此外,研究还发现花岗岩拉剪复合型(I-II)、剪切型(II)及拉张型(I)的线弹性断裂参数对高温的敏感性依次升高^[130],高温加剧了岩石裂缝的亚临界扩展(强度因子在低于断裂韧性的裂缝扩展)行为^[61-131]。

温度作用后岩石缝尖断裂过程区发育的突出断裂特性逐步得到关注(见表2),现有研究试验刻画了与温度相关的花岗岩断裂过程区发育(见图5),其研究表明当环境温度高于100℃时,花岗岩“断裂过程区长度显著增加”、“裂缝张开位移显著增大”而“抗拉强度会逐步降低”^[67-69,132],即断裂过程区的临界屈服状态发生变化,表明高温加热会加剧花岗岩断裂的塑性力学特性。

2.3 高温花岗岩宏观力学响应的微结构机制分析

上述岩石抗压、抗拉及断裂特性的随温度变化特征,主要源于不同温度作用方式所引起的岩石微

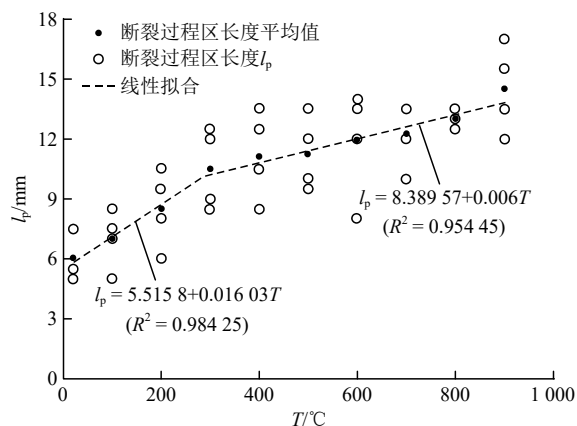
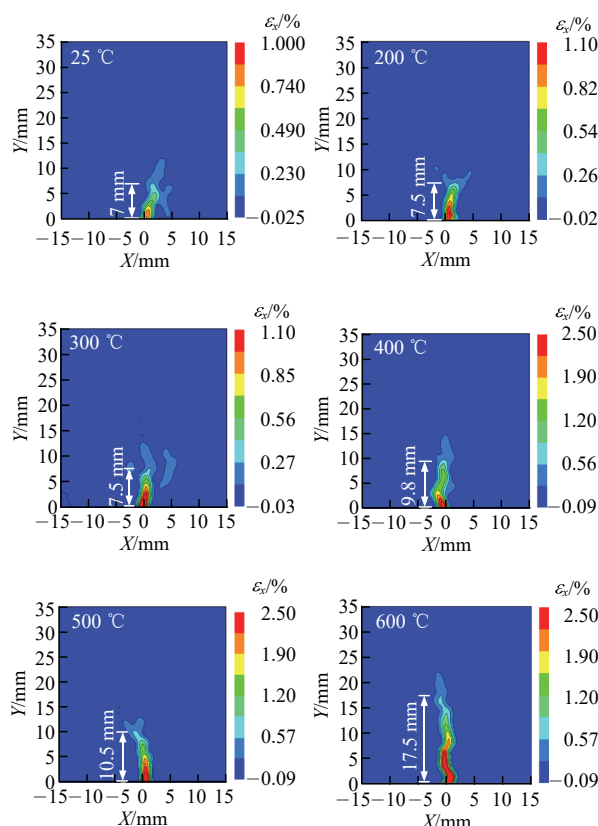
(a) 断裂过程区长度随温度演化特征(修改自 J. W. Wu 等^[68])(a) Temperature-dependent evolution of fracture process zone length (replotted from J. W. Wu, et al^[68])(b) 基于 DIC 应变场识别的断裂过程区随温度演变特征(修改自 S. T. Miao 等^[67])(b) Temperature-dependent evolution of the strain field in the fracture process zone identified by digital image correlation (DIC) (replotted from S. T. Miao, et al^[67])

图5 高温作用下的花岗岩断裂过程区发育特征

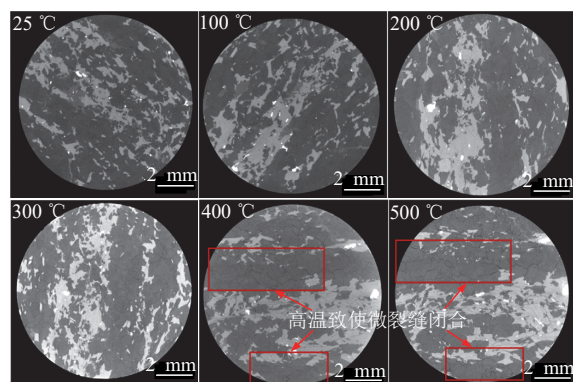
Fig.5 Development characteristics of the fracture process zone in granite after high-temperature treatments

结构改变。总体上,瞬间热冲击及循环降温温差的提升导致岩石强度的降低;而在实时高温环境与高温热处理条件下,岩石的强度及断裂韧性总体上随温度的升高而降低,但在200℃以内(尤其是实时高温条件下),岩石的抗压强度及断裂韧性具有先升高后降低的非线性变化规律。本部分将从岩石微结构的随温度变化角度,对上述与温度相关的岩石宏观力学特征变化进行机制解释。

温降冲击(瞬间降温热冲击与循环降温)对岩石强度的弱化主要归因于岩石的损伤,由于花岗岩中不同矿物晶体热膨胀系数不同,在快速降温(热冲击)条件下矿物晶体收缩变形不协调导致微裂缝大量产生^[47,133-134];随着热冲击效应的增强,微裂缝由晶间裂缝演化为穿晶裂缝^[135-136],其中超过300℃的温差热冲击将导致花岗岩网状微裂缝的形成^[137],致使强度显著弱化。

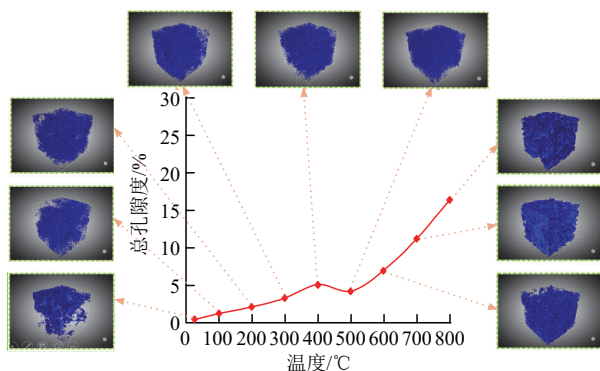
温度升高改变岩石微结构主要包括不同类型结合水析出、微裂缝发育与矿物晶体热变形3种机制:

(1) 温度的升高会改变岩石中不同类型结合水的含量^[44, 76], 在 70 °C~150 °C 范围内附着水与弱结合水完全析出, 当温度达到 200 °C~500 °C 时, 岩石内部的强结合水与矿物结晶水将先后析出, 逐步造成花岗岩中大量微裂缝的形成与连通。(2) 花岗岩微裂缝的密度及尺寸会随着温度的升高而增加^[70-75], 其中, 在 80 °C~150 °C 范围内花岗岩微裂缝尺度与密度发育极为缓慢, 当温度由 150 °C 继续提升至 573 °C 时, 花岗岩中微裂缝尺寸与密度逐步增加并愈发显著(见图 6), 当温度达到 573 °C 时, 花岗岩中石英晶体发生相变, 因而 573 °C~900 °C 花岗岩微裂缝剧烈发育并融合成大尺寸裂缝。(3) 在实时高温环境中, 矿物晶体的受热膨胀会对花岗岩产生附加作用力, 具有压实效应^[76-77]。



(a) 花岗岩微裂缝随温度升高的发育过程(承受高温环境, 25 MPa 围压以及 0.6 MPa 渗流压力)

(a) Development of microcracks in granite with increasing temperature under high-temperature conditions(25 MPa confining pressure and 0.6 MPa seepage pressure)



(b) 高温作用下花岗岩孔隙度演化特征

(b) Evolution of granite porosity under high-temperature conditions

图 6 高温花岗岩微裂缝及孔隙度演化特征(修改自 T. Meng 等^[50])

Fig.6 Evolution characteristics of microcracks and porosity in high-temperature granite(modified from T. Meng, et al^[50])

上述 3 种机制在 200 °C 以内(尤其是实时高温环境)对岩石强度及断裂韧性强弱变化的控制存在

竞争。高温造成的微裂缝发育对岩石的强度及断裂韧性有弱化作用, 但在 200 °C 以内, 附着水与弱结合水的析出增加了花岗岩中天然弱面及新增弱面的摩擦力, 对花岗岩的强度及断裂韧性有提升作用, 因此弱面摩擦与天然裂缝发育对岩石强度-断裂韧性的增强与弱化控制存在竞争, 因此, 岩石的强度及断裂韧性会出现随温度先增后降的变化规律。在此基础上, 高温实时作用使岩石内部的不同矿物发生热膨胀并产生附加热应力, 这一过程对岩石破坏行为产生双重影响: 一方面, 热膨胀引起的压实效应增强了微裂缝面间的摩擦作用, 从而提高了岩石的强度与断裂韧性, 这一现象在 200 °C 以下温度区间尤为显著; 另一方面, 由于不同矿物组分的热膨胀系数存在差异, 其变形不协调性对微裂缝的萌生及扩展具有驱动作用, 同时, 考虑裂缝断裂的尺度效应, 这种热驱动作用将随着微裂缝长度和密度的增加而更为显著。上述实时高温环境中的矿物热膨胀效应进一步加剧了高温岩石强度及断裂韧性随温度升高先增后降的演变趋势。

2.4 高温岩石损伤力学模型

基于损伤力学理论构建模型, 是定量表征高温热处理后岩石抗压力学特性的重要途径^[56-59], 本节将简要阐述高温损伤岩石的损伤力学模型构建方法。模型构建主要基于线弹性本构关系:

$$\sigma_i^* = E_T^* \varepsilon_i^* + \nu_T^* (\sigma_j^* + \sigma_k^*) \quad (1)$$

式中: σ_i^* , σ_j^* 与 σ_k^* 为考虑温度作用后损伤岩石的有效主应力, (i, j, k) 为 (1, 2, 3), (2, 3, 1) 或 (3, 1, 2); ε_i^* 为温度作用后损伤岩石的有效主应变, $i = 1, 2, 3$; E_T^* 和 ν_T^* 分别为不同温度作用后岩石有效弹性模量和有效泊松比。

通过考虑主应力的折减或弹性模量的劣化引入损伤因子, 从而建立热-力耦合条件下岩石的应力-应变本构关系^[58-59, 138-139]。主应力的折减及弹性模量的劣化计算式分别为

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{1-D} \quad (i=1, 2, 3) \quad (2)$$

$$E_T^* = (1-D)E_0 \quad (3)$$

式中: D 为损伤因子, σ_i 为主应力, E_0 为岩石损伤前的弹性模量。其中, 损伤因子 D 可以表示为热损伤因子 D_T 与加载诱导损伤因子 D_s 的耦合项^[59, 138], 计算式为

$$D = 1 - (1 - D_s)(1 - D_T) \quad (4)$$

式中: 损伤因子 D 的取值范围为 0(无损状态)~1(完全损伤)。为建立定量的本构关系, 需明确损伤因子

的表征方法。目前, 损伤因子的构建主要包括 2 类途径: 一是基于可实测的物理参数直接构造, 利用纵波波速和孔隙率构建损伤因子^[138]:

$$D_T = 1 - \frac{nV_p^*}{n_0V_p^2} \quad (5)$$

式中: V_p^* , V_p 分别为热损伤前、后岩石的波速; n , n_0 分别为热处理前、后的岩石孔隙率。

二是采用统计损伤模型^[58-59, 120, 140-141], 通过引入概率密度函数描述高温作用下岩石微元体强度的衰减规律:

$$D = \frac{N_{Tr}}{N_T} = \int_0^{F_T} P(F_T) dF_T \quad (6)$$

式中: N_T 与 N_{Tr} 分别为微元体总数目以及某一应力状态下已破坏微元体数目; P 为经高温作用后微元体强度概率密度函数; F_T 为应力水平, 反映岩石微观破坏程度的应力, 其表达形式与所选取的强度准则相关, 刻画了微元体应力状态与强度准则中强度参数的强弱关系:

$$F_T(\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k) - K_T = 0 \quad (7)$$

式中: K_T 为材料的强度参数, 在模型构建中可视为与温度相关的参量。式(7)刻画了微元体应力达到破坏的条件, 与岩石强度准则具有一致性, 进而 F_T 的表达式可基于选定的强度准则确定。

式(6)表征了统计损伤模型中损伤因子的构造方法, 也有研究仅通过式(6)表征加载诱导损伤因子 D_s 。上述 2 类方法均可用于构建 D , D_T 以及 D_s 。

确定式(6)的明确表达式包含 2 个要点: (1) 微元强度概率密度函数 $P(F_T)$ 的类型, 如现有研究常采用的 Weibull 概率分布函数^[59, 140]与 Normal 概率分布函数^[58]; (2) 高温岩石微元体应力水平 F_T 的表达式, 可基于莫尔-库仑准则^[58]、霍克布朗准则^[59]以及德鲁克-普拉格^[120, 141]等准则进行构造。本节选取“Normal 概率分布函数与莫尔-库仑准则相结合”^[58]以及“Weibull 概率分布函数与霍克布朗准则相结合”^[59]的 2 个案例呈现损伤因子的表达式, 计算式分别为

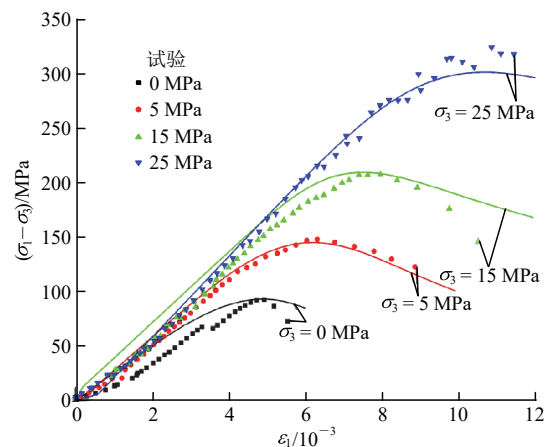
$$\left. \begin{aligned} P(F_T) &= \frac{1}{S_0\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{F_T - F_{n0}}{S_0}\right)^2\right] \\ F_T &= \sigma_1^* - \sigma_3^* - (\sigma_1^* + \sigma_3^*) \sin \phi_T \\ D &= \frac{1}{S_0\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{F_T} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - F_{n0}}{S_0}\right)^2\right] dx \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} P(F_T) &= \frac{S_0}{F_{n0}} \left(\frac{F_T}{F_{n0}}\right)^{S_0-1} \exp\left[-\left(\frac{F_T}{F_{n0}}\right)^{S_0}\right] \\ F_T &= \frac{1}{3} m I_1^* + \frac{4J_2^* \cos^2 \theta_\sigma}{\sigma_c} + m \sqrt{J_2^*} \left(\cos \theta_\sigma + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \right) \\ D_s &= 1 - \exp\left[-\left(\frac{F_T}{F_{n0}}\right)^{S_0}\right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

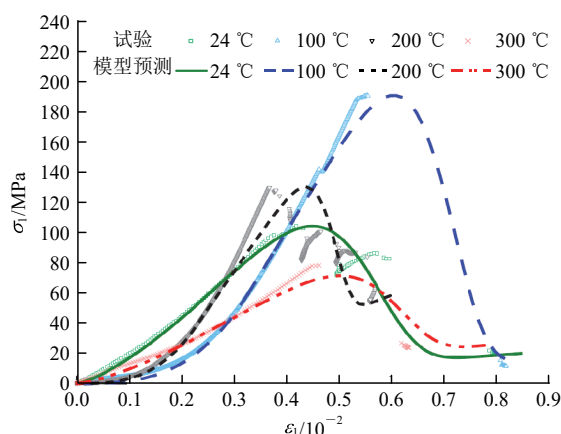
式中: $P(F_T)$ 为微元强度概率密度函数, 式(8)采用 Normal 概率分布, 式(9)采用 Weibull 概率分布; S_0 与 F_{n0} 均为概率密度函数的系数; ϕ_T 为不同温度条件下的内摩擦角; I_1^* 为有效应力的第一应力不变量, J_2^* 为有效应力的第二偏应力不变量, θ_σ 为洛德角, σ_c 为单轴抗压强度, m 为霍克布朗强度准则中的材料力学参数。式(8)中 F_T 的表达式构造于莫尔-库仑准则, 式(9)中构造于霍克布朗准则, 并通过应力不变量的形式表征。在式(9)中, 统计损伤建模仅用于刻画加载诱导的损伤因子 D_s , 将 D_s 与 D_T 代入式(4), 可确定最终的强度因子 D 。

损伤因子确定并代入式(1)后, 可得到岩石经历热损伤后的本构关系, 并结合实测岩石力学参数, 可确定概率密度函数的模型参数, 进而可定量预测不同温度作用下岩石的应力-应变关系。基于式(8)与(9)所示模型构造方法所得到的应力-应变曲线如图 7 所示^[58-59, 142], 图中 σ_1 为轴向主应力, σ_3 为围压, ε_1 为轴向应变。

除损伤力学模型外, 基于塑性力学框架的热塑性本构模型^[94-95, 143-144]是表征高温岩石力学行为的另一种重要方法, 相关内容将在下文中系统阐述。



(a) 基于 Normal 概率分布与莫尔-库仑准则的统计损伤模型预测结果 (200 °C 热处理花岗岩, 图片修改自朱振南等^[58], 散点数据引自秦 严^[142])
(a) Predictions of a Normal distribution and Mohr-Coulomb criterion-based statistical damage model against experimental data for 200 °C heat-treated granite (image modified from Z. N. Zhu et al.^[58], data from Y. Qin^[142])



(b) 基于 Weibull 概率分布与霍克 - 布朗准则的统计损伤模型预测结果 (高温热处理页岩, 修改自 Y. N. Zheng 等^[59])

(b) Statistical damage model (Weibull distribution and Hoek-Brown) predictions versus experimental data for thermally treated shale (modified from Y. N. Zheng, et al^[59])

图 7 统计损伤模型对高温热处理岩石压缩应力 - 应变曲线的预测

Fig.7 Prediction of compressive stress-strain curves for high-temperature thermally treated rock by the statistical damage model

3 干热岩压裂的试验与数值模拟研究

随着实时高温 - 高压真三轴压裂等物理模拟试验系统的研发^[22, 79, 84-85, 145-147], 2018 年以来高温岩石压裂物理模拟试验研究的关注度总体呈提升趋势。表 3 汇总了典型的高温花岗岩压裂物理模拟试验研究成果, 并形成以下 3 点共识: (1) 120 °C~600 °C 的花岗岩水力裂缝周围存在微裂缝带(见图 8(a))。W. G. P. Kumaria 等^[78]通过 CT 扫描发现微裂缝由穿晶与晶间微裂缝构成, 水力裂缝的宽度较小^[78]; Y. K. Xing 等^[79]开展了声发射监测下的高温花岗岩真三轴压裂物理模拟试验, 发现高温花岗岩相较于常温花岗岩, 压裂缝周水力微裂缝带变窄、剪切微裂缝比例降低且裂缝扩展过程中能量耗散升高(见表 3); 由于微裂缝带具有塑性软化力学特性, 高温花岗岩压裂裂缝扩展具有热塑性力学特征。(2) 低温压裂流体(水、液氮及 CO₂)接触高温岩体产生显著的温差热冲击效应, 有助于降低破裂压力、促使局部体积收缩、激活天然裂缝并诱导微裂缝形成^[80-85, 148-151]。其中液氮压裂通过增强热冲击显著提升了起裂后压裂裂缝的复杂度(见图 8(b))^[80-82, 152-153]; 而超临界 CO₂ 压裂兼具热冲击与低黏度特性, 促使超临界 CO₂ 易进入高温花岗岩的热诱导微裂缝, 降低高温花岗岩的破裂压力的同时还增加了压裂裂缝的复杂性(见图 8(c)~(d))^[83, 154]。(3) 高温花岗岩中的弱面会

诱导水力裂缝转向并沿弱面扩展(见图 8(e))^[84], 天然裂隙中的填充体利于形成多裂缝并形成高渗区^[155]。

现有高温水力压裂数值模拟研究, 不断深化多场耦合模型, 在以热流固为主(还考虑了化学)的耦合条件下, 主要聚焦“低温压裂液注入高温岩石所产生的温差热冲击与缝周降温”对水力裂缝扩展的作用机制, 研究表明向高温地层中注入低温压裂液具有温差热冲击作用, 产生的热应力促使多裂缝形成、主缝缝面形成拉张次级缝以及缝周天然裂缝激活^[85-87, 88-90], 致使起裂压力降低并更早地起裂, 但提升起裂后的缝周流体滤失并致使压裂缝扩展相较常温储层滞后^[91]; 同时低温压裂液引起的温度变化会改变井筒周围的有效应力场, 致使岩石破裂压力 - 方向及裂缝扩展轨迹发生变化^[86, 92], 并在井筒附近引发剪切型的微震事件^[156-157]。

4 高温岩石压裂的热塑性理论

4.1 高温岩石压裂的热塑性力学机制

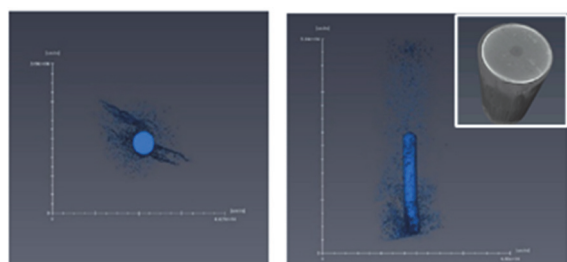
本节将结合节 2, 3 所述高温改变的岩石力学及压裂裂缝扩展特性, 聚焦高温对压裂裂缝扩展中塑性力学特性的加剧, 论述高温岩石的热塑性力学机制。

首先聚焦岩石中压裂裂缝扩展过程中所呈现的共性塑性力学特性, 该特性是高温岩石压裂裂缝呈现热塑性的源头。岩石中压裂裂缝的断裂与金属、玻璃等材料所适用的线弹性断裂特性具有显著差异, 基于已有岩石断裂研究, Y. K. Xing 等^[93]指出压裂裂缝扩展的塑性力学特性主要源于 3 个区域的塑性发育: (1) 断裂过程区发育, J. F. Labuz 等^[158-159]发现岩石类材料断裂时会在裂缝尖端形成由大量微裂缝构成的断裂过程区, 断裂过程区具有拉张软化的塑性力学特性, 当断裂过程区完全发育后, 宏观裂缝面在断裂过程区内形成^[160-162]; (2) 微裂缝带形成, 压裂裂缝扩展, 残留的断裂过程区构成了压裂缝面两侧的微裂缝带(损伤区), 裂缝两侧微裂缝带继承了完全发育断裂过程区的力学特性, 具有塑性软化的力学特征^[79, 93, 163]; (3) 缝侧塑性区形成, 对于深部, 尤其是高温高地应力地层, 压裂裂缝在已形成缝尖断裂过程区与裂缝两侧微裂缝带的基础上, 压裂裂缝的张开还会挤压两侧岩石, 致使压剪塑性区的形成^[93, 164-166]。“尖端断裂过程区”、“裂缝两侧微裂缝带”以及“裂缝张开挤压岩体形成的压剪塑性区”构成了“塑性三区”(见图 9), 致使压裂裂缝的扩展具有塑性力学特性。

表 3 实时高温花岗岩压裂物理模拟典型试验汇总

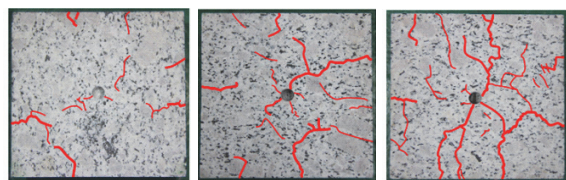
Table 3 Summary of typical physical simulation tests on granite fracturing under real-time high temperature conditions

文献来源 (literature source)	岩石类型 (rock type)	主要矿物、粒径 及物理力学参数(mineral composition, particle size and physico-mechanical parameters)	围压及 测试温度(confining pressure and test temperature)	试样尺寸 (specimen size)	压裂介质 (fracturing medium)	泵注条件 (pumping condition)	测试结果概述 (overview of test results)
W. G. P. Kumaria 等 ^[78]	花岗岩 (澳大利 亚 Strathbogie 与 Harcourt)	矿物成分: 石英、钾长石、黑云母和其他; 平均粒径: Strathbogie 花岗岩 0.3~2.5 mm, Harcourt 花岗岩 0.3~1.5 mm; 岩石力学参数: 单轴抗压强度 118~149.5 MPa, 弹性模量 17.1~18.2 GPa, 泊松比 0.22~0.27; 抗拉强度 6.6~7 MPa	伪三轴压裂, 侧向围压: 0~60 MPa; 实时高温: 20 ℃~300 ℃	圆柱形试样, 直径 22.5 mm, 长度 45 mm	水	排量: 5 mL/min	破裂压力随温度升高而降低, 压裂缝周形成微裂缝区, 主裂缝沿着颗粒边界及穿大粒径矿物扩展
郭天魁等 ^[85]	花岗岩 (山东日照)	中细粒花白色花岗岩	真三轴压裂, 围压: 10, 16, 22 MPa; 实时高温: 15 ℃, 150 ℃, 230 ℃	立方体试样, 尺寸: 300 mm×300 mm×300 mm	清水	排量: 20 mL/min	破裂压力随温度升高而降低, 岩样加热到 230 ℃后, 破裂压力下降了 4.44 MPa
Z. Zhou 等 ^[84]	花岗岩 (共和盆地)	岩石力学参数: 抗压强度 384.7~388.4 MPa, 弹性模量 40~50.2 GPa, 抗拉强度 12.26~12.42 MPa, 峰值应变 0.83%~1.2%	真三轴压裂, 围压设置类似于现场工程水平地应力差 10 MPa 与 20 MPa; 温度: 室温与 200 ℃实时高温	立方体试样, 尺寸: 300 mm×300 mm×300 mm	水	泵注排量类似于现场 1.9, 3.8, 与 10 m ³ /min 的泵注排量	高温花岗岩弱面主控压裂裂缝扩展方向, 压裂缝沿着弱面扩展难以穿层
Y. K. Xing 等 ^[79]	花岗岩 (山东)	岩石力学参数: 杨氏模量 38~43 GPa, 泊松比 0.2~0.3, 单轴抗压强度 102.9 MPa	真三轴压裂, 围压: 裸压与 10/25/30 MPa; 实时温度: 20 与 120 ℃	立方体试样, 尺寸: 300 mm×300 mm×300 mm	-20 ℃ CaCl ₂ 水溶液	排量: 2 mL/min	20 ℃提升至 120 ℃, 压裂缝宏观形态差异不大, 声发射刻画的水力微裂缝带宽度降低 40%~56.4%, 高温水力裂缝近起裂点断裂能较远井区降低约 25%, 120 ℃花岗岩微裂缝带中剪切微裂缝比例降低了 6.3%~12.3%
B. L. A. Isaka 等 ^[154]	花岗岩 (澳大利 亚 Harcourt)	矿物成分: 长石(40%)、石英(27%)、黑云母(30%)和其他; 粒径: 0.3~1.5 mm; 密度 2630 kg/m ³ ; 岩石力学参数: 单轴抗压强度 150 MPa, 弹性模量 17 GPa, 泊松比 0.22	伪三轴压裂, 侧向围压: 5~40 MPa; 实时高温: 50 ℃~300 ℃	圆柱形试样, 直径 22.5 mm, 高度 45 mm	超临界 CO ₂	排量: 30 mL/min	温度升高热诱导微缝增多且超临界 CO ₂ 易侵入, 导致破裂压力降低; 超临界 CO ₂ 压裂缝呈窄缝并伴随多条次级分支缝的几何形态
Y. Yang 等 ^[83]	花岗岩 (湖北鄂 州)	矿物成分: 斜长石(24%)、石英(21%)、钠长石(53%)和黑云母(2%); 平均粒径: 0.2~2 mm, 少量 2~5 mm; 物性参数: 体积密度 2.595 g/cm ³ ; 岩石力学参数: 单轴抗压强度 240 MPa, 抗拉强度 11.71 MPa	真三轴压裂, 围压: 20 - 40 - 60、40 - 60 - 80、60 - 80 - 100 MPa; 实时高温: 35 ℃~300 ℃	立方体试样, 尺寸: 50 mm×50 mm×85 mm	超临界 CO ₂	排量: 5 mL/min	相同地应力条件下, 温度升高破裂压力降低; 超临界 CO ₂ 低黏低密度易沟通小尺度裂隙, 导致微观裂隙体积增大而宏观裂隙体积和长度减小
S. K. Zhang 等 ^[81]	花岗岩	岩石力学参数: 杨氏模量 33.2 GPa, 泊松比 0.23	实时温度: 300 ℃~400 ℃	立方体试样, 尺寸: 150 mm×150 mm×100 mm	液氮	液氮在 2.5 MPa 条件下射流注入, 维持 2 min	液氮注入致使多条热冲击裂缝形成, 花岗岩温度升高显著增加了裂隙的数量和尺寸



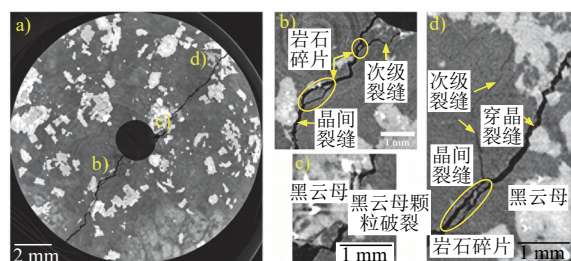
(a) 200 °C 花岗岩的伪三轴水力压裂缝 CT 扫描(修改自 W. G. P. Kumaria 等^[78])

(a) CT scanning of hydraulic fractures in 200 °C granite under pseudo-triaxial confining pressure (replotted from W. G. P. Kumaria, et al^[78])



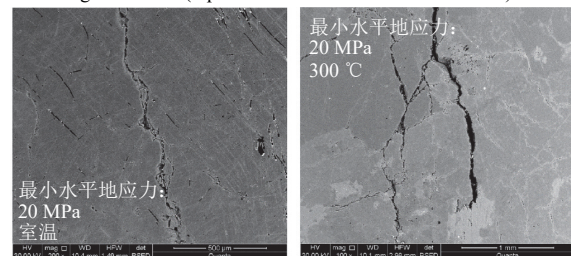
(b) 不同温度花岗岩注入液氮的裂缝形态(修改自 S. K. Zhang 等^[81])

(b) Fracture morphology of granite injected with liquid nitrogen at different temperatures (replotted from S. K. Zhang, et al^[81])



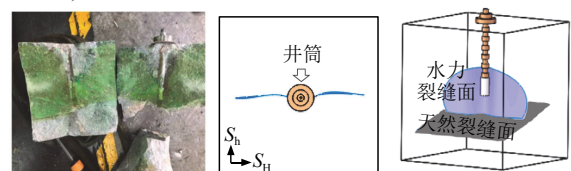
(c) 100 °C 花岗岩超临界 CO₂ 压裂缝形态的 CT 扫描(修改自 B. L. A. Isaka 等^[154])

(c) CT scans of fracture morphology in granite subjected to supercritical CO₂ fracturing at 100 °C (replotted from B. L. A. Isaka, et al^[154])



(d) SEM images of fracture morphology in granite subjected to supercritical CO₂ fracturing at room temperature and 300 °C (replotted from Y. Yang, et al^[83])

(d) SEM images of fracture morphology in granite subjected to supercritical CO₂ fracturing at room temperature and 300 °C (replotted from Y. Yang, et al^[83])



压裂裂缝面 二维压裂裂缝面示意 三维压裂裂缝面示意

(e) 250 °C 花岗岩真三轴水力压裂裂缝形态及弱面诱导转向(修改自 Z. Zhou 等^[84])

(e) Fracture morphology and weak-plane-induced diversion of hydraulic fractures in granite at 250 °C under true triaxial confining conditions (replotted from Z. Zhou, et al^[84])

图 8 高温花岗岩的水力、超临界 CO₂ 及液氮压裂物理模拟裂缝形态

Fig.8 Fracture geometries of high-temperature granite obtained from physical simulation of hydraulic, supercritical CO₂ and liquid nitrogen fracturing

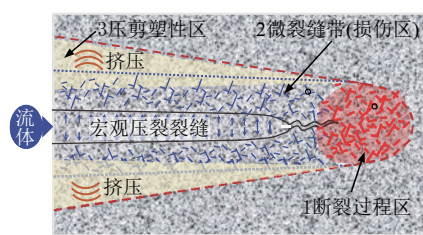


图 9 高温热储压裂缝周的热塑性三区

Fig.9 Thermoplastic tri-zones surrounding hydraulic fracture in high-temperature geothermal reservoirs

基于前文所述高温与温差冲击对岩石微观结构及塑性力学特性的显著影响,可推断温度作用会加剧“压裂缝周塑性三区”的塑性力学特性并诱发热塑性,结合国内外学者在高温岩石力学领域的研究成果,压裂裂缝的热塑性主要体现在以下 3 个方面:

(1) 针对缝尖断裂过程区,随着温度的升高,花岗岩具有塑性软化力学特性的缝尖断裂过程区尺寸增大,并伴随着断裂过程区内黏聚裂缝抗拉强度的降低与裂缝张开位移的提升^[67-68, 95, 132],该局部响应表明高温使花岗岩的断裂呈现热塑性效应;前期的岩石断裂研究发现,岩石矿物颗粒尺寸越大,断裂过程区长度也越大^[167],实验室尺度岩石的过程区长度约为最大矿物颗粒粒径的 10 倍^[159, 167],考虑到断裂过程区是缝尖塑性力学特性的主要来源,可推断高温作用下大颗粒岩石在缝尖处表现出的热塑性行为将更为显著。(2) 节 3 中压裂物理模拟试验表明,120 °C~600 °C 花岗岩压裂裂缝周围存在微裂缝带^[78-79],由于微裂缝带由断裂过程区完全发育后演变而来,缝侧微裂缝带继承了断裂过程区的热塑性力学特征。(3) 压裂裂缝的张开会使裂缝两侧岩石承受压应力^[165],在压缩条件下,岩石力学参数试验显示,温度超过 100 °C 花岗岩的初始及临界屈服应力均显著降低^[37],表明热塑性体现为屈服面在主应力空间中的初始与临界状态(包括大小与位置)以及从初始到临界状态的屈服面演化过程均受温度影响,因而,裂缝两侧在较高压剪作用下形成的塑性区,其塑性力学特征在高温条件下将更为突出^[93],呈现为热塑性压剪塑性区。此外,注入低温压裂液所引起的温差热冲击将会诱导微裂缝的形成,促使断裂过程区发育并改变其拉张塑性软化特性^[69]。因而高温及温差冲击加剧了高温岩石压裂裂缝“尖端断裂过程区”、“裂缝两侧微裂缝带”以及“裂缝张开挤压岩石所形成压剪塑性区”的塑性力学特性,并构成了“热塑性三区”(见图 9),提升了压裂裂缝扩展的塑性力学特性并呈现为热塑性。

考虑到压裂裂缝微裂缝带实质上是缝尖断裂过程区演变为宏观裂缝后的残余损伤区,热塑性区主要呈现两大力学特性:缝尖断裂过程区的热塑性断裂行为,以及裂缝两侧压剪热塑性力学响应。因此,在构建理论模型以刻画高温岩石压裂缝周热塑性区的热塑性力学特性时,需克服两大难点:一是将温度引入岩石热塑性本构整套模型,避免简单的参数修正,建立适用于岩石且完全耦合的应力-应变-温度本构关系;二是将热塑性本构与岩石断裂模型相融合,构建热塑性断裂模型。N. S. Ottosen 等^[143-144]提出了将温度引入塑性理论的建模方法,然而该建模方法主要适用于金属类材料,难以有效刻画岩石类材料同时受静水压力、偏应力及温度影响的压剪力学行为,同时无法刻画高温岩石因缝尖断裂过程区发育所显现的热塑性断裂,但 N. S. Ottosen 等^[143-144]所构建的热塑性本构模型为岩石热塑性建模提供了理论依据。近年来 Y. K. Xing 等^[69, 79, 93-94, 95]针对高温岩石压裂缝周热塑性三区的力学特性,形成了高温岩石热塑性理论:首先聚焦模型表征静水压力、偏应力及温度共同影响下的岩石压剪力学行为,构建了热塑性本构模型,重点在于形成岩石热塑性本构建模的基本框架;进而以高温岩石的断裂过程区拉张塑性软化作为纽带,将热塑性本构模型与岩石断裂模型相融合,构建热塑性断裂模型;最后基于热塑性模型,分析高温岩石压裂裂缝扩展规律。

4.2 高温岩石热塑性本构模型

4.2.1 热塑性本构模型的构建方法

本部分首先以压剪热塑性为切入点介绍热塑性本构模型的构建方法^[93-94](见图 10)。本部分所述热塑性本构模型的构造方法,主要阐述热塑性本构建模各准则的逻辑关系,从而形成热塑性本构建模框架,以提升理论的广泛适用性,即可选用或构建屈服强化准则,代入建模框架从而得到成套模型。后文将单独阐释模型的物理意义。

(1) 与温度相关的屈服强化条件

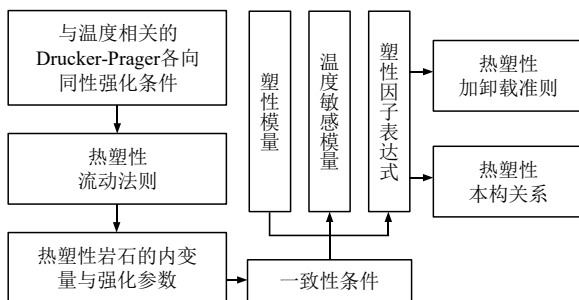


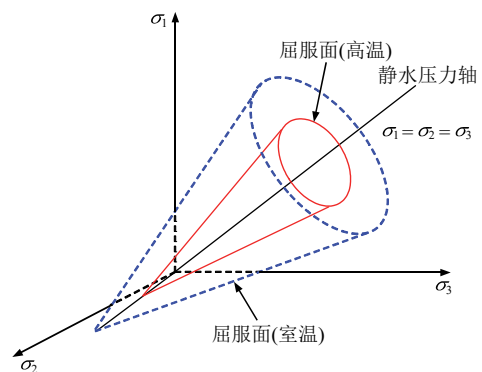
图 10 热塑性本构模型建模框架

Fig.10 Modeling framework of thermoplastic constitutive model

首先构建适用于岩石类材料且与温度相关的强化条件,本研究采用 Drucker-Prager 各向同性强化条件(见图 11), 计算式为

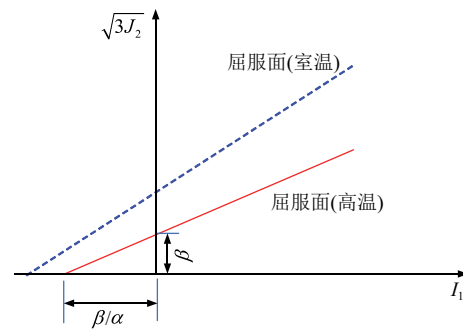
$$f(\sigma_{ij}, K_m, \theta) = \sqrt{3J_2} - \alpha(\theta)I_1 - \beta(\theta) = \sqrt{3J_2} - [\alpha_0(\theta) + K_1(\kappa_1, \theta)]I_1 - \beta_0(\theta) - K_2(\kappa_2, \theta) \quad (10)$$

式中: f 为屈服强化函数, $f < 0$ 与 $f = 0$ 分别表示弹性与塑性; σ_{ij} 为应力张量, 角标 i 与 j 取 1, 2, 3; K_m 为强化参数, 角标 m 取 1 与 2, 分别表示 2 个强化参数; J_2 为第二偏应力不变量, I_1 为第一主应力不变量; α_0 , K_1 及 κ_1 分别为与静水压力相关的初始屈服参数、强化参数及内变量; β_0 , K_2 及 κ_2 分别为与偏应力相关的初始屈服参数、强化参数及内变量; θ 为温度。



(a) 主应力空间的屈服面

(a) Yield surface in the principal stress space



(b) 子午面中的屈服面

(b) Yield surface in the meridian plane

图 11 与温度相关的屈服面示意图(修改自 Y. K. Xing 等^[94])

Fig.11 Schematic diagram of temperature-dependent yield surfaces(modified from Y. K. Xing, et al^[94])

将式(10)用于后续模型推导,以表征深部高温地层压裂裂缝张开挤压压裂缝两侧岩石所对应的压剪热塑性力学行为。此处的强化为广义概念,强化参数的正负分别表征强化与软化。与传统广泛应用的 Drucker-Prager 表达式相比,式(10)表征的屈服强化区分了静水压力与偏应力对强化的影响,并引入与温度相关的初始屈服参数及强化参数。

(2) 热塑性流动法则及强化参数-内变量表达式

进而, 将与温度相关的强化条件(式(10))引入塑性关联流动法则(式(11)), 得到与温度相关的热塑性关联流动法则(式(12)), 用以表征温度条件下塑性应变及内变量增量与屈服面变化量的关系, 构建的准则刻画了静水压力与偏应力会分别引起塑性应变、内变量的增加, 且分别对应于 2 个不同的塑性因子。同时, 可确定与静水压力及偏应力相关的强化参数与内变量的表达式, 而温度会改变强化参数与内变量的相关关系函数。塑性关联流动法则和与温度相关的热塑性关联流动法则计算式分别为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij}^p &= \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \\ \dot{\kappa}_m &= -\dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial K_m} \quad (m=1, 2) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij}^p &= -\dot{\lambda}_1(\alpha_0 + K_1)\delta_{ij} = \dot{\lambda}_h(\alpha_0 + K_1)\delta_{ij} \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^p &= \dot{\lambda}_2 \frac{\sqrt{3}s_{ij}}{2\sqrt{J_2}} = \dot{\lambda}_d \frac{\sqrt{3}s_{ij}}{2\sqrt{J_2}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \alpha_{\text{eff}}^p = -\frac{I_1 \dot{\varepsilon}_{kk}^p}{3\dot{\kappa}_1} - \alpha_0 \\ \dot{\kappa}_1 &= -I_1 \dot{\lambda}_h \approx -I_1 \dot{\varepsilon}_{kk}^p \\ K_2 &= \sigma_{\text{eff}}^p = \left(\frac{3}{2} s_{ij}^p s_{ij}^p \right)^{1/2} \\ \dot{\kappa}_2 &= \dot{\lambda}_2 = \dot{\lambda}_d = \dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^p = \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ 为塑性应变张量的增量; $\dot{\kappa}_m$ 为内变量的增量; $\dot{\lambda}$ 为塑性因子; $\dot{\lambda}_1$ 与 $\dot{\lambda}_2$ 为两个塑性因子, 为了区分两个塑性因子的物理意义, $\dot{\lambda}_h$ 为与静水压力相关的非负塑性因子, $\dot{\lambda}_h = -\dot{\lambda}_1$, $\dot{\lambda}_d$ 为与偏应力相关的非负塑性因子; s_{ij} 为偏应力张量; δ_{ij} 为克罗内克符号; α_{eff}^p 表征屈服面在等倾面中斜率的变化, 即强化参数 K_1 ; $\dot{\kappa}_1$ 可视为塑性强化阶段静水压力所作的塑性功; σ_{eff}^p 为等效应力, 即 K_2 , 表征使材料发生剪切的等效应力; s_{ij}^p 为岩石塑性加载阶段的偏应力张量; $\dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^p$ 为等效塑性应变增量, 即 $\dot{\kappa}_2$ 。式(12)将区分 $\dot{\lambda}$ 分别与静水压力和偏应力的相关性。

(3) 一致性条件与(新)模量的得出

进一步, 通过引入强化条件与强化参数的具体表达式, 可推导得到一致性条件的明确表达式:

$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\sigma}_{ij} - H_1 \dot{\lambda}_h - H_2 \dot{\lambda}_d + S \dot{\theta} = 0 \quad (14)$$

式中: S 为新模型参量; $\dot{\theta}$ 为温度增量; H_1 与 H_2 分别为与静水压力相关及与偏应力相关的塑性因子, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= -\frac{\partial K_1(\kappa_1, \theta)}{\partial \kappa_1} I_1^2 \approx \frac{d\alpha_{\text{eff}}^p}{d(I_1 \varepsilon_{kk}^p)} I_1^2 \\ H_2 &= \frac{d\sigma_{\text{eff}}^p}{d\varepsilon_{\text{eff}}^p} = \frac{3d(s_{ij}^p s_{ij}^p)^{1/2}}{2d(\dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p)^{1/2}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

塑性因子(H_1 与 H_2)大于、等于及小于 0 分别表示热塑性强化、理想塑性及软化。

结合演化条件, 通过合并同类项得到塑性模量以及温度敏感模量(新参量)。式(14)中新模型参量 S 的表达式为

$$S = \frac{\partial f}{\partial \theta} + \frac{\partial f}{\partial K_m} \frac{\partial K_m}{\partial \theta} = -\left[\frac{\partial \alpha_0(\theta)}{\partial \theta} + 2 \frac{\partial K_1(\kappa_1, \theta)}{\partial \theta} \right] I_1 - \frac{\partial \beta_0(\theta)}{\partial \theta} - 2 \frac{\partial K_2(\kappa_2, \theta)}{\partial \theta} \quad (16)$$

当岩石的温度升高时, $S > 0$ 与 $S < 0$ 分别表征屈服面收缩与膨胀, 而当 $S = 0$ 时, 表示屈服面的变化与温度无关。

(4) 热塑性本构关系及加卸载准则

通过将应变(ε_{kl})拆分为弹性应变、塑性应变(ε_{kl}^p)与热塑性应变(ε_{kl}^o), 可得到广义的弹塑性本构方程:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}(\theta)(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^p - \varepsilon_{kl}^o) \quad (17)$$

式中: D_{ijkl} 为弹性刚度矩阵。将式(17)与一致性条件联合分析, 可得到热塑性本构关系式的明确表达形式, 即应力 - 应变 - 温度的相关关系, 具体表达式由热塑性刚度矩阵(D_{ijkl}^{ep})与弹塑性变换张量(β_{ij}^{ep})进行控制(刻画温度变化引起的应力变化):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} &= D_{ijkl}^{\text{ep}} \dot{\varepsilon}_{kl} - \beta_{ij}^{\text{ep}} \dot{\theta} \\ D_{ijkl}^{\text{ep}}(\kappa_1, \kappa_2, \theta) &= D_{ijkl}(\theta) - \frac{1}{A_2} D_{ijmn}(\theta) \frac{3s_{mn}s_{st}}{4J_2} \\ &\quad D_{stkl}(\theta) - \delta_{mn} D_{ijmn}(\theta) \frac{[\alpha_0(\theta) + K_1(\kappa_1, \theta)]^2}{A_1} \\ &\quad D_{stkl}(\theta) \delta_{st} \beta_{ij}^{\text{ep}}(\kappa_1, \kappa_2, \theta) = \frac{1}{A_1} \{ S[\alpha_0(\theta) + K_1(\kappa_1, \theta)] + [\alpha_0(\theta) + K_1(\kappa_1, \theta)]^2 \delta_{mn} P_{mn} \} \cdot \\ &\quad D_{ijkl}(\theta) \delta_{kl} - \frac{1}{A_2} D_{ijkl}(\theta) \cdot \\ &\quad \left(\frac{\sqrt{3}S}{2\sqrt{J_2}} s_{kl} - \frac{3}{4J_2} s_{kl} s_{mn} P_{mn} \right) - P_{ij} \\ S &= \frac{\partial f}{\partial \theta} + \frac{\partial f}{\partial K_m} \frac{\partial K_m}{\partial \theta} = -\left[\frac{\partial \alpha_0(\theta)}{\partial \theta} + 2 \frac{\partial K_1(\kappa_1, \theta)}{\partial \theta} \right] \cdot \\ &\quad I_1 - \frac{\partial \beta_0(\theta)}{\partial \theta} - 2 \frac{\partial K_2(\kappa_2, \theta)}{\partial \theta} \\ A_1 &= (\alpha_0 + K_1)^2 \delta_{ij} D_{ijkl} \delta_{kl} + H_1 \\ A_2 &= (\sqrt{3}s_{ij} / 2\sqrt{J_2}) D_{ijkl} (\sqrt{3}s_{kl} / 2\sqrt{J_2}) + H_2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: s_{mn} 与 s_{st} 均为偏应力张量。

根据与静水压力相关及与偏应力相关的两个塑性因子的正负性, 结合塑性因子的表达式, 可得到加卸载判别准则:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\lambda}_h &= LUC_1 = \frac{1}{A_1} [-(\alpha_0 + K_1) \delta_{ij} \dot{\sigma}_{ij}^e + S \dot{\theta}] \\ \dot{\lambda}_d &= LUC_2 = \frac{1}{A_2} \left(\frac{\sqrt{3} s_{ij}}{2 \sqrt{J_2}} \dot{\sigma}_{ij}^e + S \dot{\theta} \right) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} f=0 \text{ 且 } LUC_1 > 0 \text{ 或 } LUC_2 > 0 &\Rightarrow \text{热塑性加载} \\ f=0 \text{ 且 } LUC_1 = 0 \text{ 且 } LUC_2 = 0 &\Rightarrow \text{中性加载} \\ f=0 \text{ 且 } LUC_1 < 0 \text{ 且 } LUC_2 < 0 &\Rightarrow \text{热塑性卸载} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: LUC_1 和 LUC_2 分别为与静水压力相关和与偏应力相关的热塑性加卸载判别因子。

为确定本构模型中的各项参数, 需重点关注初始屈服至临界屈服之间的塑性演化阶段, 通过分析不同围压及温度条件下的应力-应变曲线得以确定, 进而得到本构模型的明确表达式, 可预测不同

温度与应力条件下的全应力-应变曲线。本节基于 M. Masri 等^[168]开展的高温岩石伪三轴抗压力学试验数据, 确定了热塑性本构模型的具体参数, 据此得出本构关系的具体表达式, 并将模型预测结果与试验曲线进行对比验证^[94, 168]。图 12 所示的对比结果表明, 模型预测与试验数据的一致性高达 93%。证明了模型构建及假设条件(各向同性强化与关联流动)的有效性。

4.2.2 模型构建的物理逻辑及意义

本部分将针对前文所述的抽象模型推导, 阐释模型构建关键点的物理逻辑及意义。

温度引入模型: 温度在本构关系中成为独立参量, 取决于图 10 所示各项准则的逻辑递进而非简单的参数修正。在所构建的强化条件中, 初始屈服参数与强化参数是温度的函数, 在引入一致性条件后, 对屈服强化函数求全微分, 屈服强化函数对温度的偏导以及强化参数对温度的偏导, 可分离出温度项。进而经前文所述系列推导, 温度可作为独立项引入最终的本构关系。

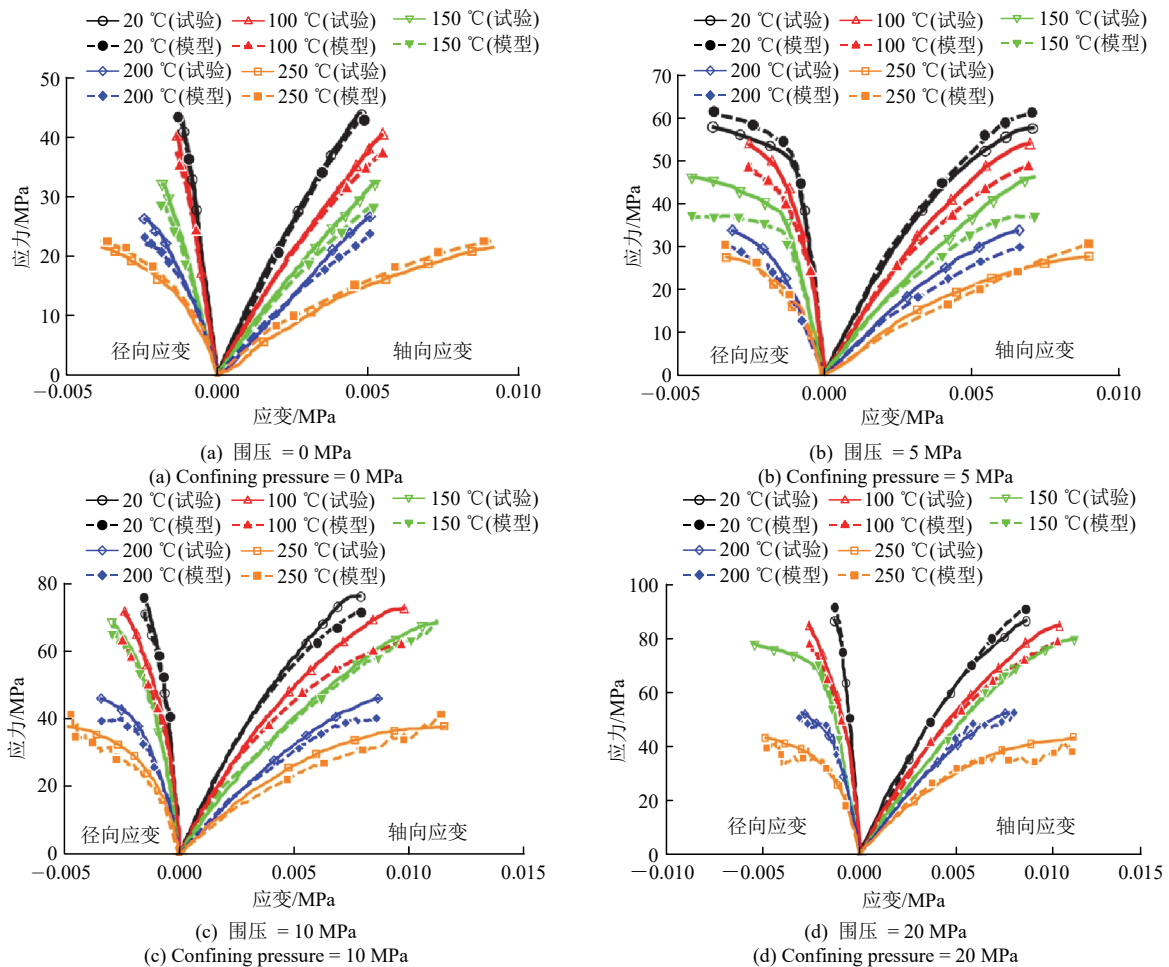


图 12 不同温度与围压条件下压剪热塑性本构模型所确定的应力应变曲线与试验结果的对比(修改自 Y. K. Xing 等^[94, 168])
Fig.12 Comparison between stress-strain curves from thermoplastic shear-compression constitutive model and experimental results under varying temperature and confining pressure conditions (modified from Y. K. Xing, et al^[94, 168])

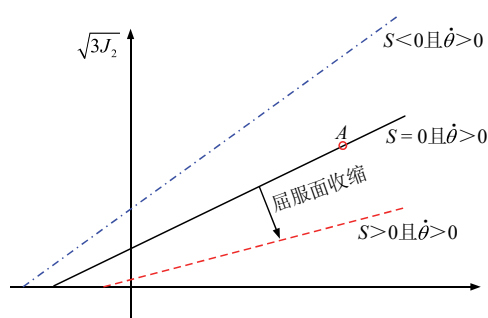


图 13 温度敏感模量与子午面中屈服面变化的相关性 (修改自 Y. K. Xing 等^[94])

Fig.13 Correlation between temperature-sensitive modulus and yield surface variation in the meridional plane (modified from Y. K. Xing, et al^[94])

得到了新的模型参量：在本模型中得到了温度敏感模量，该参量是传统与温度无关的岩石塑性理论所没有的，该参量的正负性刻画了温度升高导致岩石屈服面膨胀、收缩或不变的热塑性力学特性，如图 13 所示。为揭示温度敏感模量 S 的物理意义，假设存在特殊的应力状态满足 $\dot{\sigma}_{ij} = 0$ 且 $\dot{\lambda}_h$ 与 $\dot{\lambda}_d$ 均为 0，在该条件下，式(14)所示的屈服函数全微分满足 $\dot{f} = S\dot{\theta}$ ，当温度升高至一临界值使 $f = 0$ 时，后续温度升高导致屈服函数 f 的正负变化取决于温度敏感模量 S ：若 $S > 0$ ，则 $\dot{f} > 0$ ，表明随着温度的

升高，尽管应力状态保持不变， f 具有升高至大于 0 的趋势，该过程显然表明屈服面的收缩；若 $S = 0$ ，表明屈服面的变化与温度变化无关；若 $S < 0$ ，则 $\dot{f} < 0$ ，表明随着温度的升高，屈服面膨胀使得初始应力状态距离屈服面越来越远。

模型对岩石剪切强度“静水压力与偏应力”双重相关性的刻画：岩石类材料的抗剪强度与静水压力及偏应力均相关，通俗来讲围压越大强度越高。因此，本构模型的屈服强化以 Drucker-Prager 准则为基础，分别引入“与静水压力相关”以及“与偏应力相关”的初始屈服参数与强化参数，其中初始屈服参数是温度的函数(见图 14)，强化参数是内变量(区分静水压力相关与偏应力相关)和温度的函数(见图 15)。其中，与静水压力相关的强化参数代表子午面中屈服面斜率增量(见图 11)，与之对应的与静水压力相关的内变量表征静水压力产生的塑性功；与偏应力相关的强化参数表征等效应力($\sqrt{3}J_2$)，与之对应的内变量代表等效塑性应变；强化参数与内变量之间的函数关系是与温度相关的。进而，后续推导所得的与温度相关的塑性因子、塑性模量(正值表示强化、负值代表软化、0 代表理想弹塑性)以及热塑性卸载判别因子均为 2 个，分别对应于静水压力与偏应力。

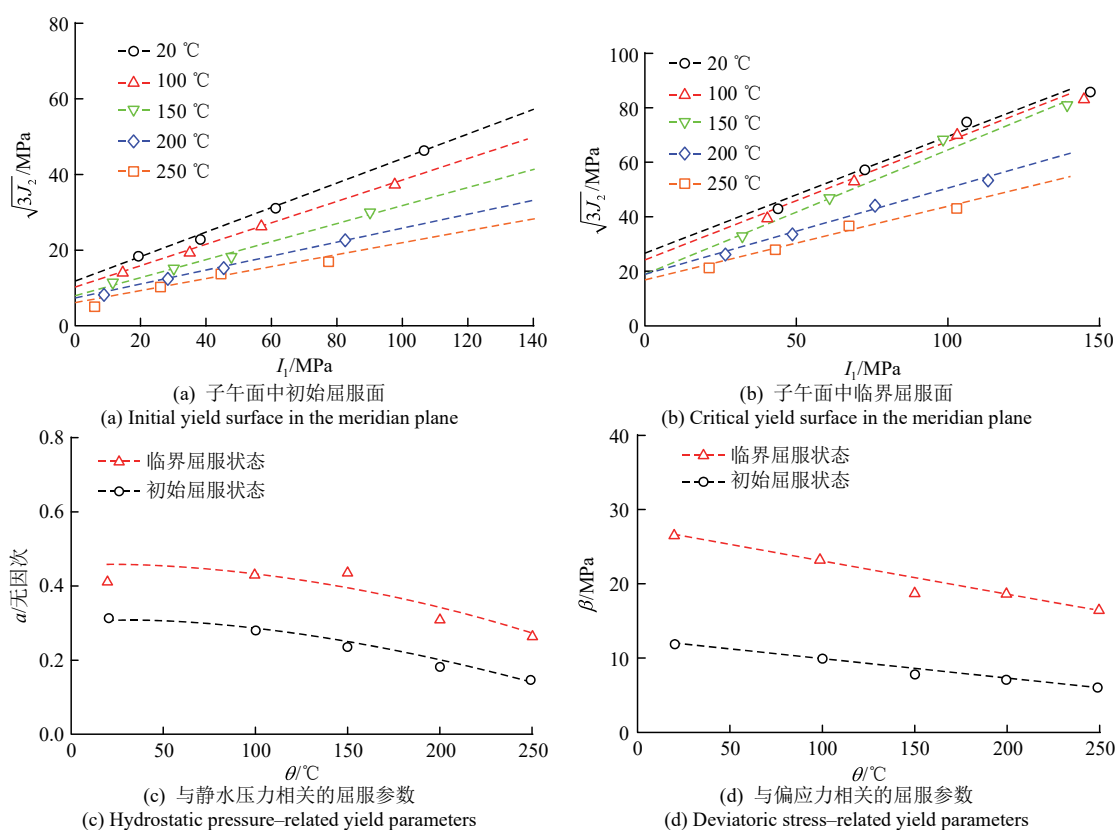


图 14 不同温度下初始与临界屈服参数的变化规律(修改自 Y. K. Xing 等^[94])

Fig.14 Evolution patterns of initial and critical yield parameters at different temperatures (modified from Y. K. Xing, et al^[94])

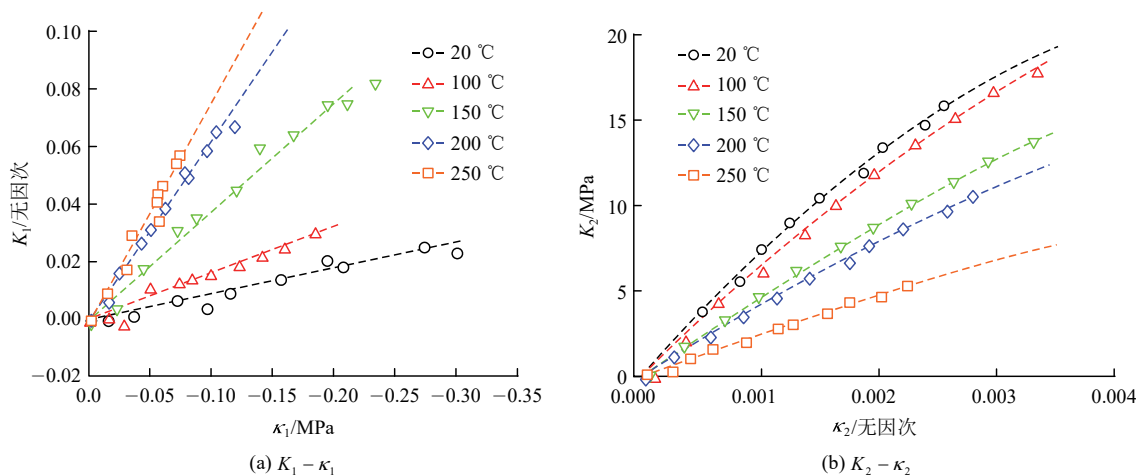


图 15 不同温度下强化参数与内变量的相关性(修改自 Y. K. Xing 等^[94])

Fig.15 Correlation between hardening parameters and internal variables at different temperatures(modified from Y. K. Xing, et al^[94])

本构关系的普遍性主要体现在 3 个层面：(1) 本模型得到的本构关系，其意义在于通过有限的试验确定模型参数后，可预测不同温度与应力条件下的全应力 - 应变曲线，从而更为普遍地刻画岩石力学特性。(2) 将本构关系中温度项移除时，表示模型与温度无关，此时本构关系将退化为传统的弹塑性本构关系，因此，同时适用于高温与常温岩石。(3) 热塑性本构模型的构建方法具有普遍适用性，针对不同力学特性的岩石，可通过试验确定模型参数，或在模型构建过程中选取不同的屈服强化准则，进而构建出更具适用性的应力 - 应变 - 温度本构关系。

岩石热塑性力学特性的多参量刻画：通过构建的热塑性本构模型，可确定初始与临界屈服参数随温度的演化关系(见图 14)，描述热塑性开始发育时及强度达到峰值时的应力状态与温度的相关性；可确定随温度变化的强化参数 - 内变量的相关关系，确定岩石热塑性强化及软化的演变规律(见图 15)；可确定温度敏感模量，评价热塑性发育强弱与温度变化的相关性，即温度升高致使屈服面收缩、膨胀或不变(见图 13)。进而，相比于仅通过不同温度下的弹性模量与峰值强度刻画高温岩石力学特性，更有利于发现岩石力学特性的温度敏感性。

热塑性加载与温度相关：本模型所构建的加载卸载准则，包含与静水压力相关以及与偏应力相关的 2 个加载判别因子，只要有一个判别因子大于 0，则表示热塑性加载(见图 16)。其中，如式(19)~(20)所示，热塑性判别因子包含应力项与温度项，则表明温度变化可直接导致热塑性力学特性加剧。

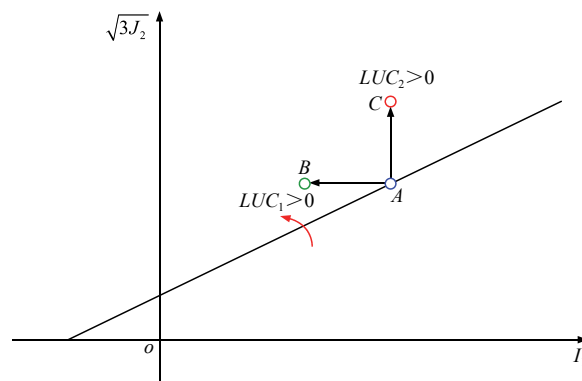


图 16 由静水压力与偏应力导致的热塑性加载示意图(修改自 Y. K. Xing 等^[94])

Fig.16 Schematic diagram of thermoplastic loading induced by hydrostatic pressure and deviatoric stress(modified from Y. K. Xing, et al^[94])

本节所述的热塑性本构模型，主要呈现温度引入、各准则构造以及各准则关联性的构造方法，局限性主要体现在所选屈服准则及强化条件对高温岩石塑性力学特征的适用程度。目前的钻井深度已突破万米，岩石所处的高围压及高温环境超出了可广泛研究的岩石力学试验测试能力，因此，选用已有的屈服及强化条件极有可能适用性有限，在该情况下需构造新的准则。而新构建的屈服及强化准则可代入本节所述的热塑性本构建模框架，从而实现对应力 - 应变 - 温度关系的定量描述与试验验证，这也是本节所述建模方法提升模型普适性的关键着力点。

4.3 高温岩石的热塑性断裂模型

岩石类材料的断裂与金属、玻璃等材料所适用的线弹性断裂特性具有显著差异，其突出断裂特性表现为裂缝尖端会形成由大量微裂缝构成的断裂过程区，当断裂过程区完全发育后，宏观裂缝面在断

裂过程区内形成,进而裂缝扩展,断裂过程区随宏观缝尖的延伸而前移^[158, 160-163]。断裂过程区具有塑性软化的力学特性,通常表现为拉张塑性软化^[79, 93, 95]。在此基础上,高温储层压裂裂缝扩展过程中,储层高温与温差热冲击作用下岩石矿物颗粒(或晶体)的膨胀与收缩、不同类型结合水的相继析出以及微裂缝萌生-融合会加剧缝尖断裂过程区的塑性力学特性,使岩石断裂呈现为热塑性。

通过构建热塑性断裂模型,可确定与温度相关的岩石断裂本构关系,同时可得到更多的断裂参量以综合刻画高温岩石断裂特性。

4.3.1 热塑性断裂模型的构建

由于岩石基质的压裂裂缝扩展以拉张裂缝为主,且现有研究表明拉张、剪切、拉张复合以及压剪复合型断裂,主要取决于缝尖的受力状态,但断裂过程区的变形均以拉张为主,因此,热塑性断裂建模主要聚焦于拉张型断裂。G. Q. Zhang 等^[160]所开展的岩石断裂光学与声发射联合监测研究已证

实,岩石拉张裂缝尖端的断裂过程区具有裂缝状的拉张变形特征,即在断裂过程区内,潜在裂缝形成位置的张开位移自宏观缝尖至过程区前缘逐步减小,如图 17 所示,该变形特性表明断裂过程区的塑性软化力学特性可通过黏聚裂缝刻画,单位长度黏聚裂缝达到黏聚抗拉强度时开始软化,裂缝张开位移增加直至达到临界状态,黏聚力消失且单位长度宏观裂缝面形成。在断裂过程区内,宏观缝尖的黏聚裂缝拉张软化程度最强,而断裂过程区最前缘的拉张软化程度最弱(见图 18)。由于相比于黏聚裂缝的拉张软化阶段,黏聚裂缝在拉张弹性及强化阶段的裂缝张开度极小,因此,热塑性黏聚裂缝模型的推导聚焦拉张塑性软化力学特性。

因而,可将断裂过程区内黏聚裂缝的拉张软化力学特性作为纽带,将热塑性本构建模方法引入岩石热塑性断裂并构建热塑性断裂模型^[69, 93, 95]。拉应力导致黏聚裂缝张开并软化的物理过程与 Rankine 拉伸屈服软化条件在原理上是一致的。因而,在不

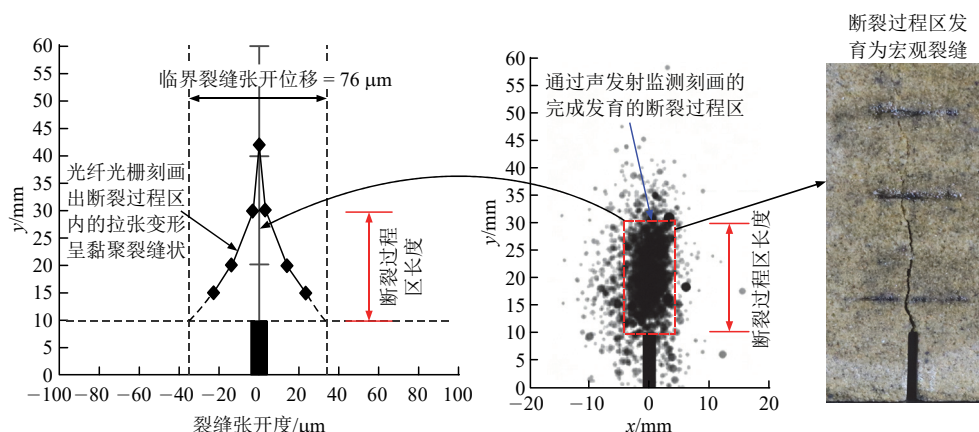


图 17 光学与声发射联合监测所刻画的断裂过程区内的黏聚裂缝(修改自 G. Q. Zhang 等^[160])

Fig.17 Cohesive fracture within the fracture process zone characterized by integrated optical-acoustic emission monitoring (modified from G. Q. Zhang, et al^[160])

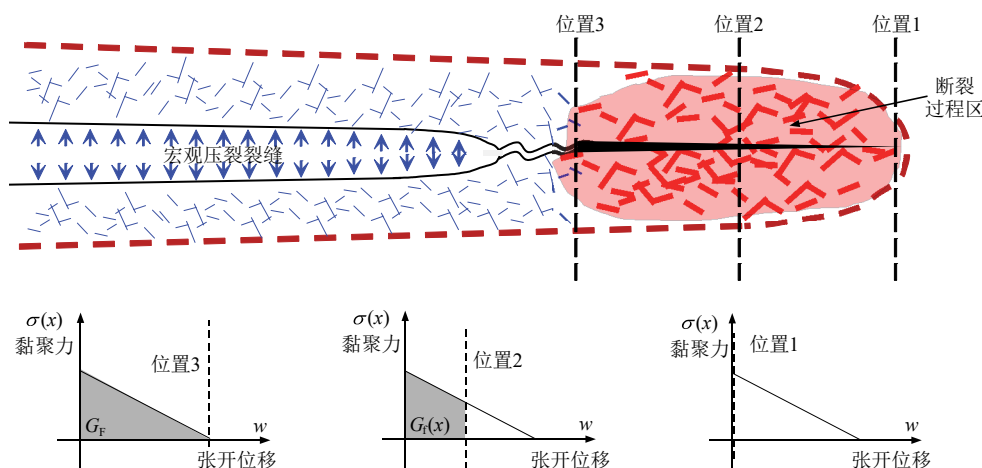


图 18 断裂过程区各位置黏聚裂缝的拉张软化曲线示意图

Fig.18 Schematic diagram of tension-softening curves for cohesive fracture at distinct locations within the fracture process zone

同温度下,黏聚裂缝可在主应力空间进行表征,如图 19 所示。高温改变黏聚裂缝的软化可表征为断裂过程区屈服面的等向收缩与膨胀。基于塑性力学理论^[143],塑性强软化条件下应力状态应始终在屈服面上,因此在黏聚裂缝的塑性软化阶段,作用于黏聚裂缝的拉应力始终与黏聚力相等。进而,得出了与温度相关的屈服软化函数:

$$f(\sigma_1, K_1, \theta) = \sigma_1 - \sigma_1(\theta) - K_1(\kappa_1, \theta) \quad (21)$$

式中: σ_1 为与温度相关的黏聚抗拉强度,即初始屈服参数; κ_1 为自变量,软化参数(即热塑性本构模型的广义强化参数取负值) K_1 是 κ_1 与 θ 的函数,表征黏聚力的折损量。作用于单位长度黏聚裂缝的最大拉应力 σ_1 在数值上与黏聚力 σ_1^p 相等。

基于式(21)所示的屈服软化关系,可参照如图 10 所示的热塑性本构建模框架,推导得到表征断裂过程区热塑性力学特征及基于黏聚裂缝的热塑性断裂模型。

将式(21)代入至塑性流动法则,可确定表征高

温岩石热塑性断裂的黏聚裂缝内变量具体表达式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{w}^p &= \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma_1} = \dot{\lambda} \\ \dot{\kappa}_1 &= -\dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial K_1} = \dot{\lambda} \\ \dot{\kappa}_1 &= \dot{w}^p \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

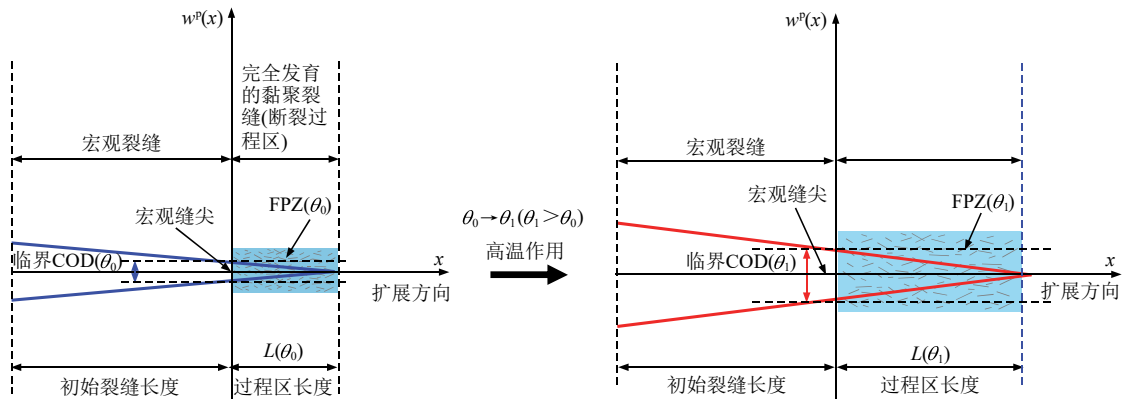
式中: $\dot{w}^p$ 为黏聚裂缝张开位移增量, $\dot{\lambda}$ 为非负的塑性因子。内变量为黏聚裂缝拉张软化的张开位移,同时塑性因子 $\dot{\lambda}$ 的表达式易于确定。

为得到本构关系以及与温度相关的塑性模量与温度敏感模量,需将屈服强化函数 f 与强化参数 K_1 代入与温度相关的一致性条件:

$$\dot{f}(\sigma_1, K_1, \theta) = \frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \dot{\sigma}_1 + \frac{\partial f}{\partial K_1} \dot{K}_1 + \frac{\partial f}{\partial \theta} \dot{\theta} = 0 \quad (23)$$

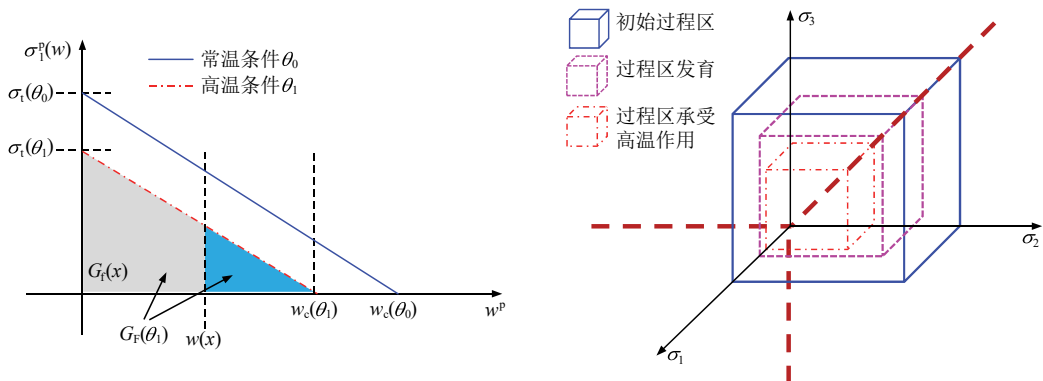
由于 K_1 是 θ 与 κ_1 的函数, $\dot{K}_1$ 的表达式为

$$\dot{K}_1(\kappa_1, \theta) = \frac{\partial K_1}{\partial \kappa_1} \dot{\kappa}_1 + \frac{\partial K_1}{\partial \theta} \dot{\theta} = \frac{\partial K_1}{\partial \kappa_1} \dot{\lambda} + \frac{\partial K_1}{\partial \theta} \dot{\theta} \quad (24)$$



(a) 高温促使的断裂过程区发育及其软化特性

(a) Development of fracture process zone and its softening characteristics induced by high temperature



(b) 高温与常温岩石单位长度断裂过程区的拉张软化曲线

(b) Rock tensile softening curves per unit length of fracture process zone at room and high temperature

(c) 温度作用下主应力空间内断裂过程区屈服面拉张塑性软化演变图

(c) Evolution of tensile plastic softening yield surface in the fracture process zone within principal stress space under thermal effect

图 19 热塑性黏聚裂缝断裂模型概化示意图(修改自 Y. K. Xing 等^[69-95])

Fig.19 Schematic model of thermoplastic cohesive crack(modified from Y. K. Xing, et al^[69-95])

将式(24)代入式(23), 可得到物理意义更明确的热塑性黏聚裂缝一致性条件:

$$\left. \begin{aligned} \dot{f}(\sigma_1, K_1, \theta) &= \dot{\sigma}_1 - H_c \dot{\lambda} + S_c \dot{\theta} = 0 \\ H_c &= \frac{\partial K_1(\kappa_1, \theta)}{\partial \kappa_1} = \frac{\partial \sigma_1^p(\kappa_1, \theta)}{\partial w^p} \\ S_c &= -\frac{\partial \sigma_1(\theta)}{\partial \theta} - 2 \frac{\partial K_1(\kappa_1, \theta)}{\partial \theta} = \\ &= -\frac{\partial \sigma_1(\theta)}{\partial \theta} - 2 \frac{\partial \sigma_1^p(\kappa_1, \theta)}{\partial \theta} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中: H_c 为与温度相关的塑性模量, H_c 取值为正、0 及负数分别表示塑性强化、理想塑性及塑性软化, 针对岩石断裂过程区发育而导致的热塑性主要为塑性软化, 在该条件下 H_c 为负; S_c 为温度敏感模量, 其取值为正、0 及负分别表示随着温度(高温、温度热处理或温差热冲击)的提高屈服面收缩、不变(与温度无关)以及膨胀。

进一步通过式(25)可得到热塑性黏聚裂缝的本构关系式:

$$\dot{\sigma}_1^p = H_c(\theta) \dot{w}^p - S_c \dot{\theta} \quad (26)$$

式(26)表征了单位长度黏聚裂缝(表征断裂过程区)黏聚力随着裂缝张开位移与温度的演变。其中 θ 可视为广义的温度参量, 可分别表征实时高温、高温热处理及温差热冲击(低温流体接触高温岩石的瞬间温差作用), 尽管温度作用形式不同, 但均表征温度对岩石热塑性断裂造成的影响。与之对应的其他与温度相关的模型参数, 其表达形式不变, 具体取值可通过断裂试验测定。

上述热塑性断裂模型推导基于 2 个假设条件: 岩石热塑性力学响应服从与温度相关的各向同性强化, 岩石热塑性力学响应服从与温度相关的关联流动法则。通过对比高温热处理与高温中模型预测^[95, 169]与实测^[67, 169]花岗岩临界累积耗散能, 一致性分别达 81% 与 88%, 验证了假设条件及模型推导的有效性。

对于高温条件下断裂过程区几乎不发育的强脆性岩石, 由于缺乏塑性变形机制作为建模基础, 本节所述热塑性断裂模型将不再适用, 此类情况宜采用线弹性断裂理论进行描述。

4.3.2 热塑性断裂特性的表征参量

通过上述热塑性断裂模型, 还可以得到 7 个热塑性断裂参量, 即模型参数, 用于更为全面地刻画与温度相关的岩石断裂特性。7 个热塑性断裂参量及其物理意义如表 4 所示。

表 4 热塑性断裂参数及其物理意义

Table 4 Thermoplastic fracture parameters and their physical significance

热塑性断裂参数 (thermoplastic fracture parameters)	符号 (symbol)	物理意义 (physical significance)
黏聚抗拉强度	σ_1	断裂过程区或黏聚裂缝开始发育时所对应的初始屈服参数
临界裂缝张开度	w_c	单位长度真实裂缝形成时所对应的临界屈服参数
完全发育的断裂过程区长度	L	与裂缝扩展阻力相关的依赖于温度的参量
塑性模量	H_c	表征塑性软化规律, 即 $K_1 - \kappa_1$ 或 $\sigma_1^p - w^p$ 的相关关系, 取值正、0 及负表示塑性强化、理想塑性及塑性软化; 塑性软化时, 绝对值越小, 表明热塑性软化程度越高
温度敏感模量	S_c	刻画随着温度提升屈服面膨胀或收缩规律
断裂能	G_F	形成单位长度真实裂缝时, 与温度相关的裂缝扩展阻力
累积耗散能	G_D	断裂过程区完全发育时, 与温度相关的裂缝起裂阻力

在表 4 所示的 7 个参量中, 黏聚抗拉强度 σ_1 、临界张开位移 w_c 、塑性模量 H_c 以及温度敏感模量 S_c , 在热塑性断裂模型的模型推导中已经出现; 形成断裂过程区是岩石热塑性断裂的根源, 发育完全的断裂过程区长度为 L , 其大小将影响累积耗散能; 断裂能 G_F 与累积耗散能 G_D 是基于本构关系的引申参量, 分别表征与温度相关的裂缝扩展阻力与起裂阻力, 在适当简化条件下可视为 σ_1 , w_c 与 L 的组合参量, 具体推导如下: 如图 19 所示, 在不同温度与温度作用形式下, 单位长度黏聚裂缝的黏聚力-张开位移软化关系刻画了断裂过程区的塑性力学特性, 在断裂过程区完全发育之前, $\sigma_1^p - w^p$ 软化曲线下的积分面积表征单位长度裂缝的耗散能 G_F (见图 18 和 19), 计算式为

$$G_F(\theta, w_x) = \int_0^{w_x} \sigma_1^p(\theta, w^p) dw^p \quad (27)$$

式中: w_x 为发育中单位长度黏聚裂缝(即断裂过程区)的裂缝张开位移。

一旦黏聚力消失, 裂缝张开位移达到临界值, G_F 累积至最大值, 即单位长度裂缝的断裂能 G_F :

$$G_F(\theta) = \int_0^{w_c} \sigma_1^p(\theta, w^p) dw^p \quad (28)$$

进而单位长度的黏聚裂缝发育为真实裂缝。在断裂过程区发育过程中, 自宏观缝尖至过程区前缘,

黏聚裂缝软化程度递减, 断裂过程区发育过程中的累积耗散能(G_d)可通过对 G_f 沿断裂过程区长度(l)方向积分获得, 计算式为

$$G_d(\theta, l) = \int_0^l G_f(\theta, x) dx \quad (29)$$

式中: x 为沿断裂过程区扩展方向的位置。如果断裂过程区完全发育, 断裂过程区或黏聚裂缝长度达到临界值 L , G_d 达到临界值, 即完全发育断裂过程区中的累积耗散能 G_D , 计算式为

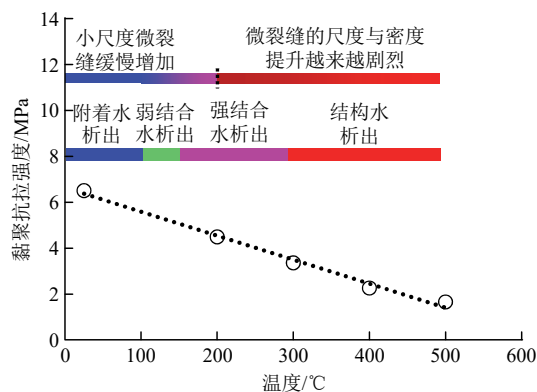
$$G_D(\theta, L) = \int_0^L G_f(\theta, x) dx \quad (30)$$

其中, 单位长度黏聚裂缝软化曲线以及 w_x 沿黏聚裂缝的分布可采用线性简化^[69, 93, 95, 160], 进而 G_F 与 G_D 可通过 σ_t , w_c 与 L 的组合量予以表征。

表 4 所示的 7 个参量中, 黏聚抗拉强度、临界张开位移及临界断裂过程区长度是 3 个基本模型参量, 可直接测定; 其余模型参量可通过模型推导确定。试验测试重点在于刻画断裂过程区的变形及缝尖受力特征, 缝尖黏聚力可通过加载曲线的载荷值确定, 缝尖的拉张变形可通过位移传感器、数字图像相关及光纤光栅等方法测定, 断裂过程区的长度

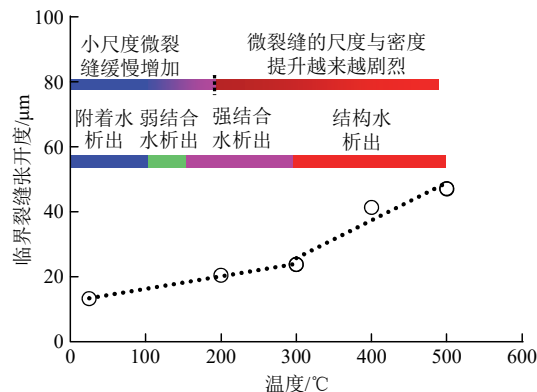
则常通过数字图像相关变形场分析或声发射定位技术予以确定。

针对高温及温差热冲击作用(低温压裂液接触高温岩石)的花岗岩, 表 4 中 7 个热塑性断裂参量综合刻画的岩石热塑性断裂特征如图 20(参量分析与确定采用 S. T. Miao 等^[67]公开发表的试验数据)与 21 所示, 相较于线弹性断裂理论的断裂韧性或能量释放率, 热塑性断裂理论为高温岩石压裂设计提供了更多评价因子。高温热处理花岗岩的热塑性断裂特征体现为: 随着热处理温度的提升, 黏聚抗拉强度降低, 而裂缝张开位移及断裂过程区长度增大, 致使塑性模量增大, 断裂能与临界累积耗散能呈非线性变化; 温度敏感模量随裂缝张开位移的提升而降低, 取值由正转为负。温差(低温)热冲击岩石热塑性断裂特征体现为: 除温度敏感模量外的 6 个热塑性断裂参量随温差增加而降低, 且温差超过 140 °C 降低趋势更为显著; 随着裂缝张开位移增加, 温度敏感模量以 140 °C 为界先升高后降低(由正转负)。温度敏感模量正、负及正-负过渡取值所表征的黏聚裂缝屈服面随温度变化规律及其对应的软化曲线演变如图 22 所示。



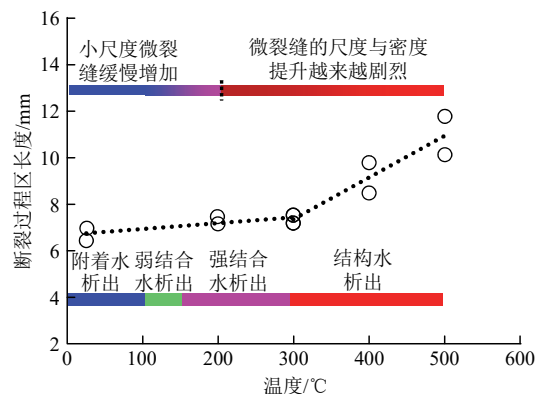
(a) 黏聚抗拉强度

(a) Cohesive tensile strength



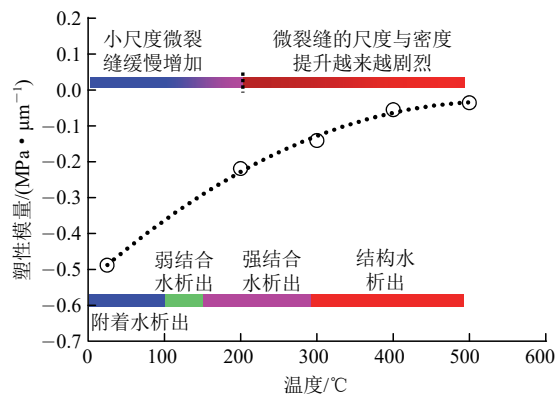
(b) 临界裂缝张开度

(b) Critical crack opening displacement



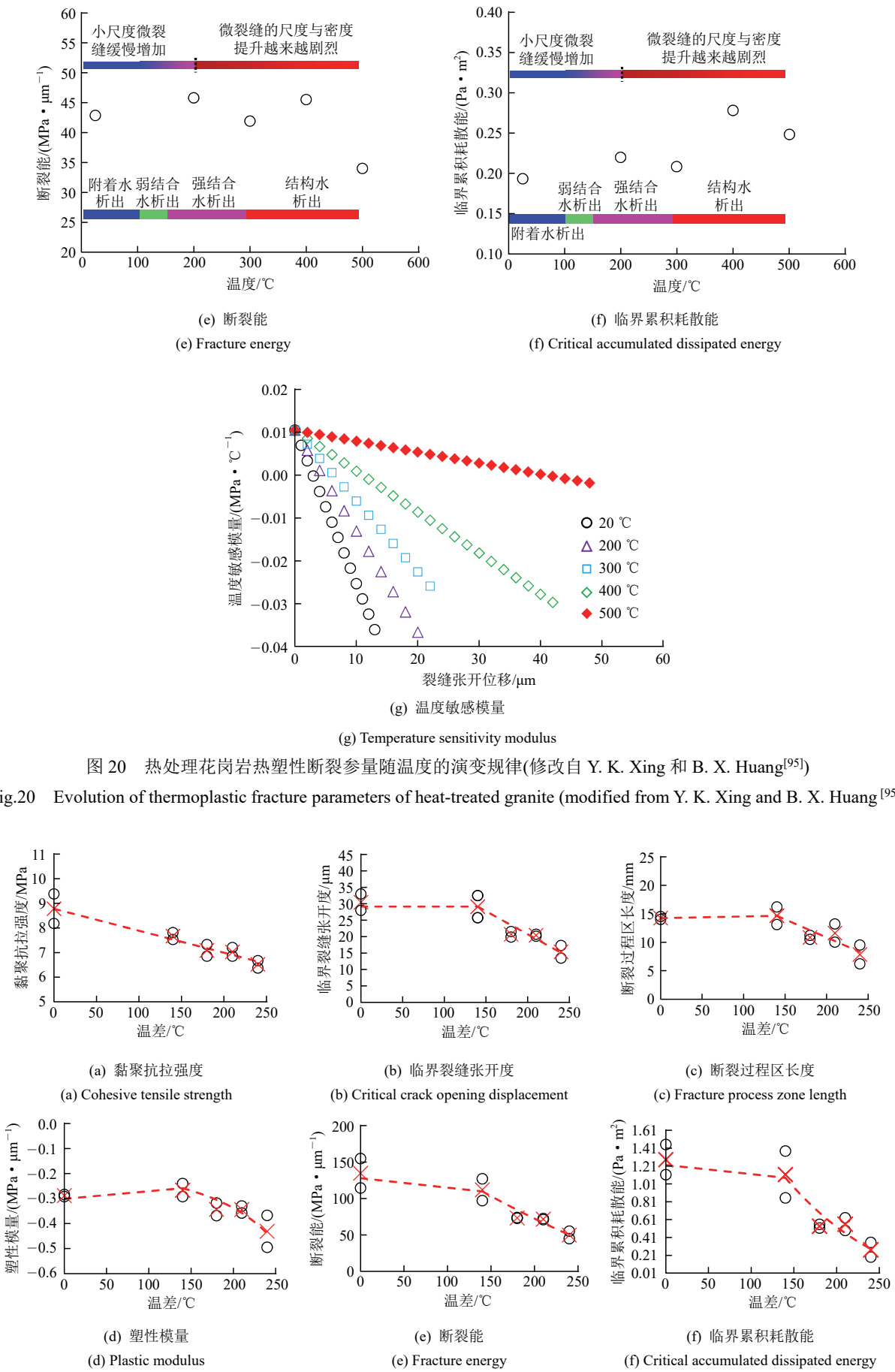
(c) 断裂过程区长度

(c) Fracture process zone length



(d) 塑性模量

(d) Plastic modulus



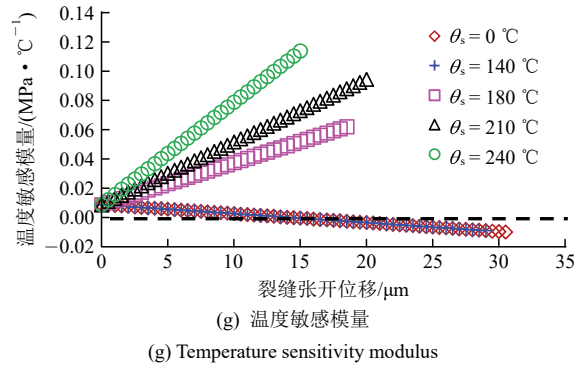


图 21 温差热冲击花岗岩热塑性断裂参量随温差的演变规律(修改自 Y. K. Xing 等^[69])

Fig.21 Evolution of thermoplastic fracture parameters in granite under thermal shock with temperature difference (modified from Y. K. Xing, et al^[69])

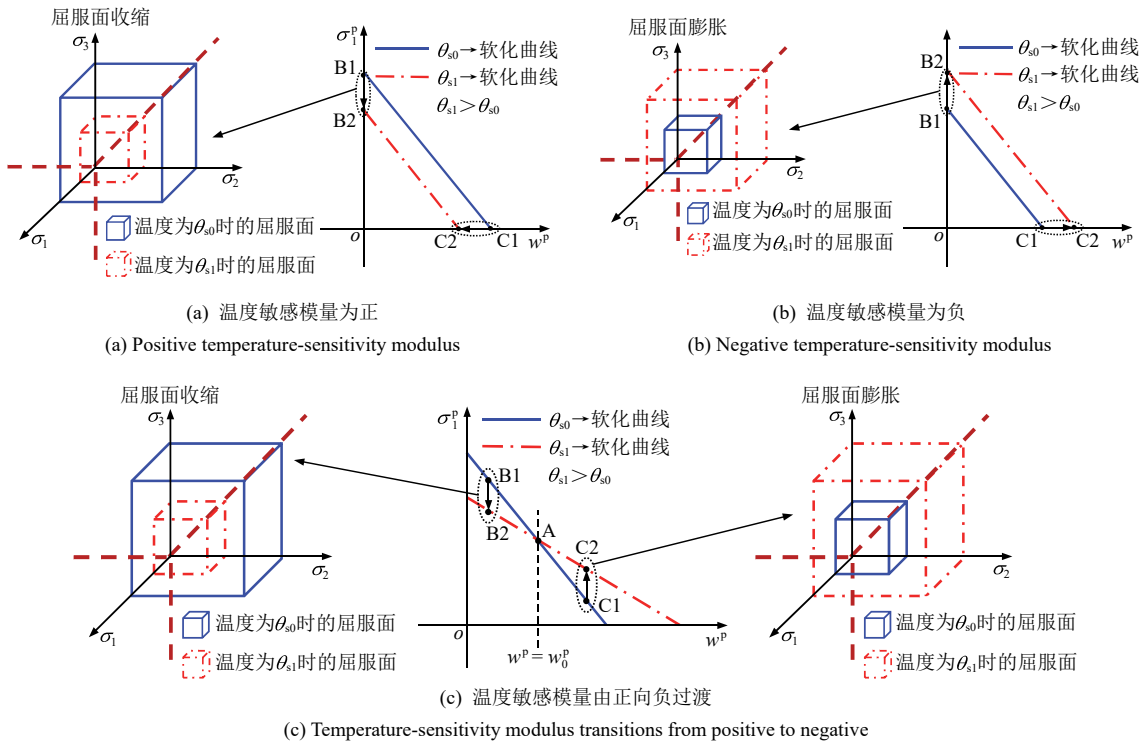


图 22 温度敏感模量的正负性与黏聚裂缝软化曲线的相关关系示意图(修改自 Y. K. Xing 等^[69, 95])

Fig.22 Schematic diagram of correlation between sign dependency of temperature-sensitive modulus and cohesive crack softening curves (modified from Y. K. Xing, et al^[69, 95])

图 23 对比了温差热冲击条件下用于评价裂缝扩展阻力的能量释放率(线弹性)及热塑性断裂能, 可发现能量释放率(线弹性)远低于热塑性断裂能, 且变化趋势不同(图中 G_{IC} 为能量释放率)。其原因为线弹性断裂参量主要基于弹性应力的临界值评价裂缝扩展阻力, 而热塑性断裂能及累积耗散能同时包含了热塑性软化过程中的应力、裂缝张开位移及过程区长度, 该结果表明热塑性断裂不可忽略。

4.4 高温岩石压裂缝扩展的热塑性断裂响应特征

前期采用高温高压真三轴压裂物理模拟试验系统开展的压裂物理模拟研究表明, 高温及温差热冲击对压裂裂缝扩展的影响, 不仅改变了宏观裂缝形

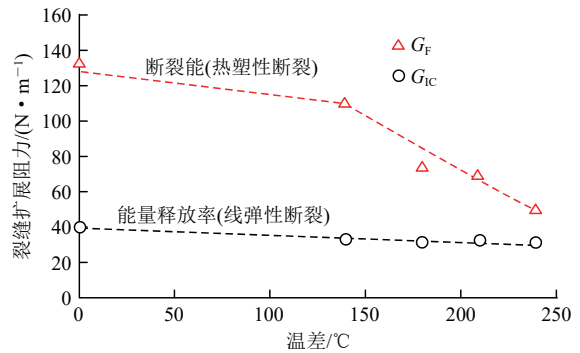


图 23 断裂能与能量释放率分别刻画的裂缝扩展阻力 (修改自 Y. K. Xing 等^[69])

Fig.23 Crack propagation resistance characterized by fracture energy and energy release rate respectively(modified from Y. K. Xing, et al^[69])

态及起裂压力,还体现于水力裂缝缝周微裂缝区的热塑性断裂响应特征^[79, 163]。

在压裂裂缝扩展过程中,宏观缝尖的断裂过程区不断演变为压裂裂缝两侧的水力微裂缝带,鉴于高温岩石断裂过程区是岩石热塑性断裂的根源,因此水力微裂缝带记录了压裂裂缝扩展过程中的热塑性断裂响应特征;而水力微裂缝带中微裂缝的形成及融合会释放出弹性波,即广义声发射(压裂现场微地震及实验室尺度岩样的高频弹性波),因此,声发射监测可刻画水力微裂缝带内微裂缝的演化特征,为表征压裂裂缝的热塑性断裂特性创造了条件。120 °C 高温环境中,边长 300 mm 立方体花岗岩压裂裂缝形态以及基于自研 RockAE 声发射监测软件刻画的水力微裂缝带如图 24 所示。20 °C 与 120 °C 花岗岩在泵注-20 °C 压裂液(CaCl₂ 溶液)条件下的压裂裂缝形态差异不大(见图 24),但由声发射所刻画的水力微裂缝带的“尺寸、沿扩展方向断裂能(近似正比于累积声发射能量)及剪切型微裂缝占比”三个热塑性断裂响应因子差异显著。上述 3 个响应因子是单条压裂裂缝增渗改造效果的评价参量:微裂缝带尺寸越大单缝改造体积越大;断裂能越低裂缝越容易向远端扩展;剪切微裂缝因自支撑抑闭合,剪切微裂缝占比越高微裂缝区增渗效果越好。

试验结果表明花岗岩温度由 20 °C 提升至 120 °C

时,花岗岩水力微裂缝带宽度由 94~100 mm 降低至 41~60 mm,降低了 40%~56.4%;120 °C 花岗岩水力裂缝在近起裂点断裂能低,约为远井筒区的 25%,表明高温水力裂缝扩展过程中阻力提升进而容易止裂,对应于泵注压力曲线所呈现的双峰波动(见图 25),即压裂裂缝“扩展-止裂-再扩展”间歇性扩展的宏观响应特征;此外,120 °C 花岗岩水力微裂缝带中的剪切微裂缝比例相较于室温花岗岩降低了 6.3%~12.3%。

上述微裂缝带 3 个响应因子在高温条件下的变化,主要归因于低温压裂液接触高温岩石所产生温差热冲击:温差热冲击致使高温水力微裂缝区中的损伤更集中于宏观裂缝形成处,致使微裂缝带无需在宽度方向充分发育就足以使宏观缝面产生,进而微裂缝带宽度降低;随着缝长增加,压裂液与岩石的温差自起裂点至缝尖递增,近井筒区压裂裂缝承受的温差热冲击高于远井筒区,使得压裂裂缝在扩展过程中断裂能提升(见图 21 和 24);低温压裂液使矿物颗粒收缩,致使拉张微破裂程度高于常温岩石,进而降低了剪切微裂缝占比。总体上,高温花岗岩压裂裂缝的增渗改造效果较常温降低(见图 24),且裂缝容易因扩展过程中的阻力提升而止裂(见图 24 和 25),因而在干热岩及高温储层压裂过程中需考虑随缝长增加提升排量抑制止裂并适度增加支撑剂防止

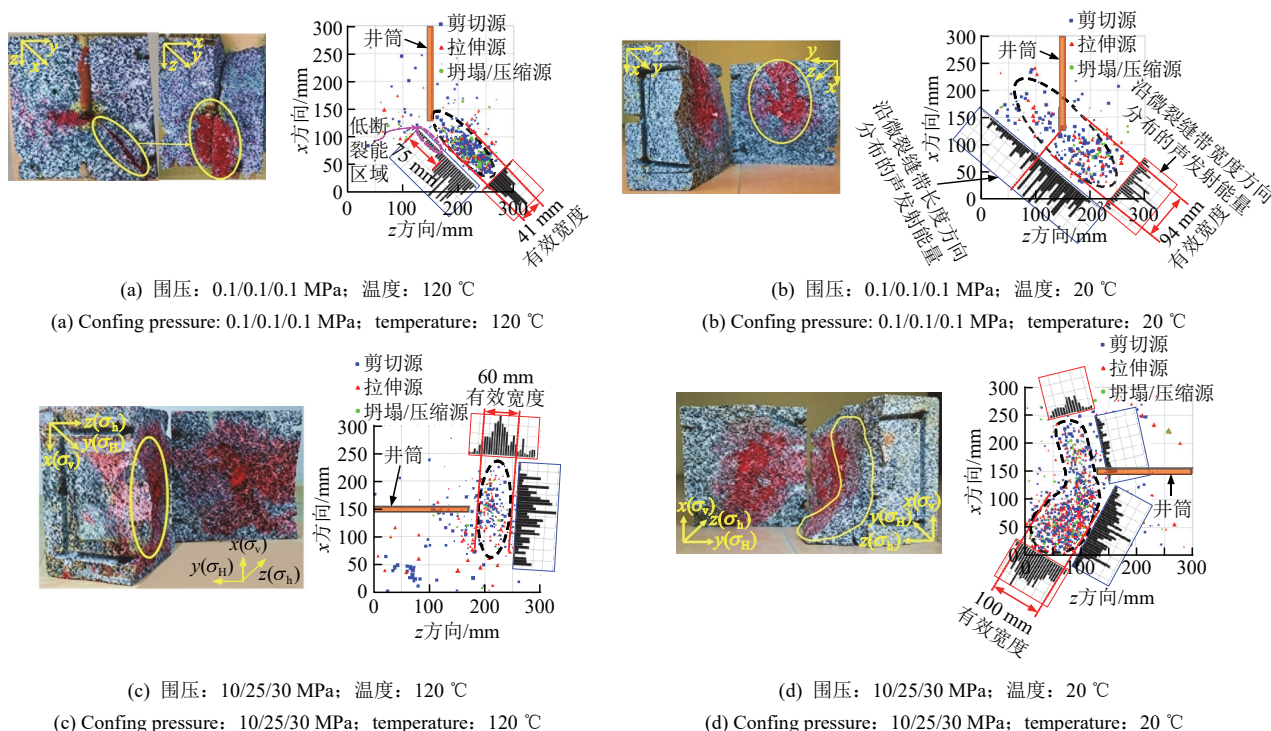


图 24 温度与围压影响下的花岗岩压裂裂缝形态与声发射能量-震源机制的空间分布(修改自 Y. K. Xing 等^[79])

Fig.24 Hydraulic fracture geometries and spatial distribution of acoustic emission energy and source mechanisms under temperature and confining pressure effects(modified from Y. K. Xing, et al^[79])

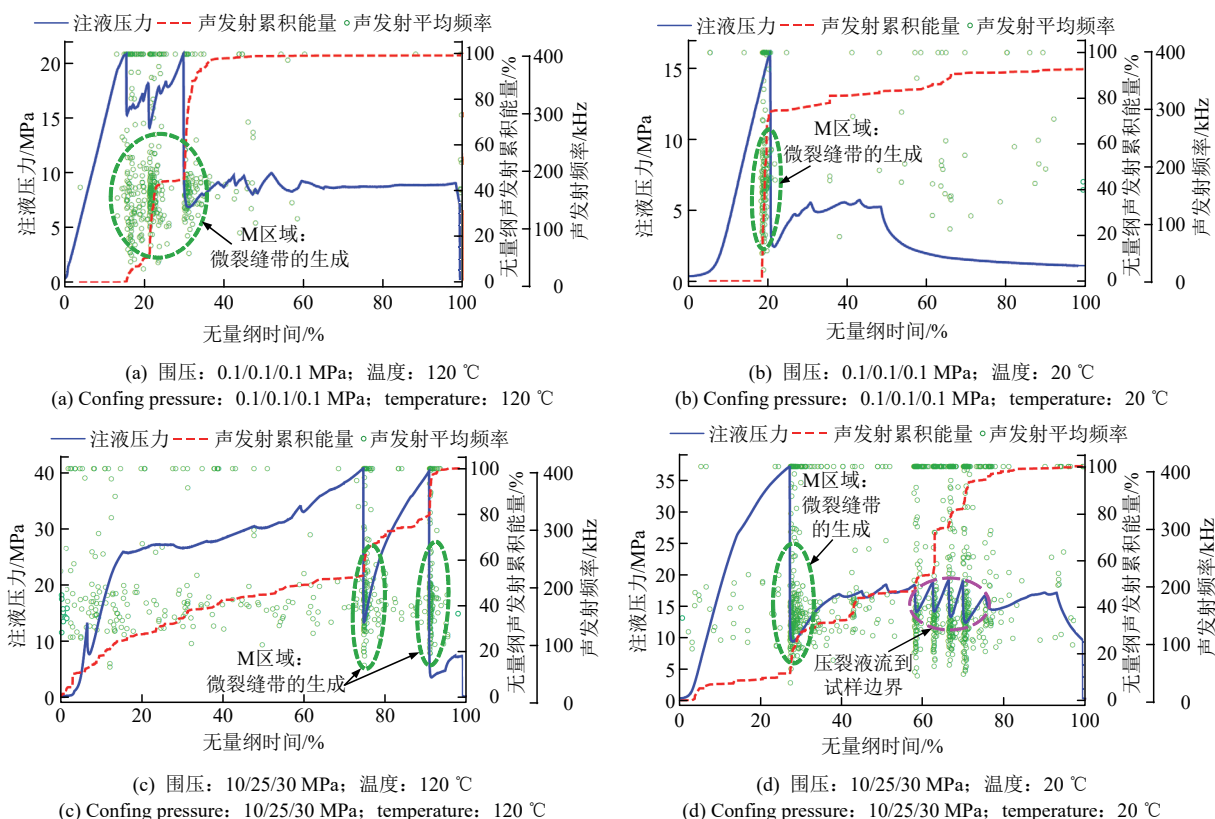


图 25 不同温度花岗岩真三轴压裂泵注压力及声发射能量-频率演化曲线(修改自 Y. K. Xing 等^[79])

Fig.25 Evolution curves of injection pressure and acoustic emission energy-frequency during true triaxial fracturing of granite at varying temperatures(modified from Y. K. Xing, et al^[79])

裂缝闭合, 但该规律及优化建议仅通过宏观裂缝形态与泵注曲线难以刻画, 需通过热塑性断裂响应因子进行评价并支撑压裂设计与工艺优化。

5 高温岩石力学的工程启示与挑战

5.1 高温岩石力学对干热岩地热工程的启示

5.1.1 钻井效率提升与井壁稳定控制

确定高温岩石的弹性、强度及热塑性力学特性是提升干热岩钻井效率与保障井壁稳定的根本前提, 也是后续压裂作业顺利实施的先导环节。研究表明, 干热岩在实时高温环境下抗压强度与弹性模量呈现先增后降的非单调变化规律, 而温差热冲击会进一步降低其强度; 超过 100 °C 的高温环境使花岗岩型干热岩的热塑性力学特性显现。基于此, 应系统分析随深度变化的地应力(围压)与温度耦合作用下干热岩强度与弹性参数的演化规律, 明确其非单调变化的拐点温度, 并进一步通过热塑性本构模型确定热塑性本构关系并评价热塑性发育程度, 据此针对性优化钻头选型、钻压与转速等参数, 促进高温坚硬干热岩地层的高效剪切破岩钻进。同时,

需综合考虑地层温度与钻井液-地层温差效应, 准确评估目标井段的初始屈服与临界破裂的井壁破裂压力与坍塌压力, 进而精确计算钻井液安全密度窗口, 优化钻井液性能, 确保井壁稳定, 保障后续压裂施工。

5.1.2 促起裂与抑止裂的干热岩压裂控制策略

干热岩压裂过程中, 起裂阶段主要表现为岩石拉伸破坏, 而后续压裂缝扩展则呈现为岩石的持续断裂。优化压裂方案需首先评估裂缝扩展中以“线弹性”或“热塑性”为主导的断裂机制, 并针对动态变化的扩展阻力优化泵注参数。具体优化策略如下: (1) 节 2.1 中研究表明, 花岗岩类干热岩的抗拉强度随温差热冲击作用显著降低, 因此通过增大压裂液与地层之间的温差, 可有效促进起裂并诱导形成分支裂缝, 液氮压裂是该机制的典型例证。(2) 在裂缝扩展阶段, 由于热塑性断裂能显著高于能量释放率(线弹性断裂参数)(见图 23), 即热塑性断裂条件下的裂缝扩展阻力更高, 因而压裂设计需首先评估高温地层条件下缝尖断裂过程区的发育程度, 以及裂缝张开对围岩造成的压剪热塑性屈服状态, 从而判断断裂机制的主导类型(线弹性或热塑性)。在此

基础上, 应依据对应的断裂模型合理评估裂缝扩展阻力并设计泵注参数, 避免因沿用线弹性理论而低估热塑性断裂的实际阻力, 导致裂缝未达预期规模即发生止裂。对于以线弹性断裂为主的储层(具体取决于岩性、温度与地应力条件), 可依据节 2.3 所述断裂韧性随温度“先增后降”的规律, 结合储层实际温度判断其处于韧性增强区或降低区, 进而针对性优化泵注程序以控制扩展规模。(3) 随着裂缝向前延伸, 压裂液在缝内升温导致其低温冲击效应减弱。声发射监测下的高温压裂缝物模试验表明(见图 24 和 25), 高温花岗岩压裂过程中热塑性断裂能呈动态上升趋势, 扩展阻力随之增大, 易引起中途止裂, 从而抑制注采井间有效连通。为此, 建议采用阶梯升排量工艺, 持续补充裂缝扩展动力, 以抑制因断裂能上升导致的止裂风险, 促进形成连通注采井的有效热交换缝网。

5.1.3 多级多尺度压裂缝网构建与导流性保障

干热岩压裂缝周的热塑性区实质为缝尖与缝侧受力特性存在差异的微裂缝区, 为实现干热岩压裂形成注采井间大规模密集缝网的核心目标, 需充分促进热塑性区内次级裂缝的充分扩展以形成大规模缝网, 并保障压裂缝的长期导流。(1) 聚焦多尺度缝网构建, 建议采用循环泵注与超临界 CO_2 压裂相结合的工艺, 以实现“抑制主缝过度延伸”并“激活-驱动热塑性区内次级裂缝扩展”的双重效果; 但考虑到热储高温及循环泵注条件下次级缝网易处于扩展速率缓慢的亚临界状态, 在循环泵注后建议转入连续泵注并配合多级暂堵工艺, 以提升裂缝扩展驱动力、引导裂缝远场延伸并促进分支裂缝的形成。通过重复上述“循环泵注”与“连续泵注多级暂堵”的多级压裂工艺循环, 促使形成多级多尺度大规模压裂缝网^[170]。(2) 在形成复杂缝网的基础上, 需重点保障其长期导流性能。建议在精确评估对采热效率无显著影响的前提下, 针对性泵注超细支撑剂。其作用包括两方面: 一是对热塑性区内已激活的次级裂缝进行有效支撑; 二是补偿因温差冲击导致的缝周微裂缝自支撑能力下降, 如节 4.4 所述, 温差冲击可提升拉张型微裂缝占比, 同时降低剪切型微裂缝比例, 从而削弱热塑性区内微裂缝的自支撑作用。超细支撑剂的介入可有效维持微裂缝张开状态, 促进形成具备持续导流能力的多尺度热交换缝网系统。

5.2 挑 战

(1) 高温岩石力学试验中试样边界位移约束考

虑不足, 影响高温岩石力学特性的热应力相较实际地层条件偏低。不论是高温热处理、实时高温以及温差热冲击的温度作用形式, 高温岩石的边界都普遍缺少位移约束, 即试样存在自由边界, 与实际地层中岩石因地层近似无限大而边界位移受约束的条件相比, 差异显著; 试样自由边界使岩石在高温及热处理条件下可膨胀, 且在低温热冲击条件下可收缩, 进而弱化了岩石中高温及温度变化而形成的热应力。因此, 在试验层面, 需研发具有位移约束功能的高温高压试验装置, 使岩石在边界位移受约束的条件下经历热-力作用, 并增强热应力效应的可观测性与可量化程度; 并在理论层面区分自由位移边界下矿物颗粒变形不协调与边界位移约束条件下热应力对岩石力学特性的影响机制, 进一步提升热力学耦合模型对深部高温地质条件的适用性。

(2) 需明确区分实时高温与高温热处理对岩石力学特性的影响差异, 并将矿物颗粒细观参数纳入本构模型构建。然而, 高温热处理主要引发岩石的热损伤, 岩石的力学响应及裂缝扩展行为以损伤为主导; 而实时高温环境使岩石兼具热损伤与矿物颗粒热变形, 共同影响岩石的热塑性力学特性, 但因实时高温试验难度较高, 其研究相较高温热处理条件相对有限。因此, 后续高温岩石力学研究需在试验与理论层面区分热损伤与实时高温两种温度影响机制; 在此基础上, 聚焦实时高温作用, 建模表征多种矿物的排布、粒径及热物理力学参数等细观参数与热塑性本构模型宏观力学参数的相关关系, 将细观参数引入热塑性本构模型, 进一步提升模型对刻画高温岩石力学特性的适用性。

(3) 热塑性理论与压裂裂缝扩展模型的融合尚不充分, 亟需在流-固-热-化学(Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical, THMC)多场耦合框架下推进其集成与应用, 以提升对工程尺度干热岩压裂裂缝扩展行为的刻画能力。尽管现有研究已构建热塑性本构建模框架以及热塑性断裂模型, 并针对实时高温、高温热处理及温差热冲击条件下岩石所呈现的压剪与断裂热塑性进行了刻画, 但目前利用热塑性理论刻画压裂裂缝扩展主要基于模型的物理意义进行间接表征, 热塑性断裂模型尚未与压裂裂缝扩展模型进行深度融合, 难以通过热塑性指标定量预测裂缝扩展路径与形态。后续研究需将热塑性理论嵌入压裂裂缝扩展判据并用于刻画缝周岩石变形, 量化地质及工程条件(排量、液量、压裂液介质等)对压裂裂缝热塑性断裂的影响, 明确热塑性力学特性对缝

内流体压力、压裂液滤失、缝周温度分布及流体 - 岩石化学作用的影响机制, 并构建模型进行表征; 在此基础上, 发展集成热塑性模型的干热岩压裂 THMC 全耦合数值平台, 开展工程尺度裂缝扩展模拟, 揭示多场耦合环境下裂缝动态演化规律; 以此为依据, 通过合理简化构建可解析求解的压裂预测模型, 实现对不同地质与工程条件下裂缝扩展规律的快速评估, 为现场压裂设计提供理论与数值依据。

(4) 高温储层压裂多缝的形成与扩展机制仍需深入研究。干热岩压裂均以形成复杂缝网为理想改造目标, 目前以低排量泵注连通大范围天然裂缝的干热岩水力剪切缝网压裂被广泛关注, 但对于干热岩基质以及天然裂缝发育程度较低的热储, 在实验室以 mL/min 泵注条件下, 仍以形成单一及有限条宏观裂缝面为主。目前的岩石断裂及压裂理论, 主要以理论刻画单条裂缝的断裂及扩展特征为主, 多裂缝相互干扰及缝网形成 - 扩展相对不足, 针对干热岩, 甚至是深部高温油气储层以及需高温改性开采的油页岩、富油煤等高温岩层, 岩石高温将提升多裂缝形成及扩展的理论表征难度, 致使高温储层多缝压裂工艺优化缺少坚实的理论依据。因此, 后续研究需探明温度及缝周温度变化对压裂多缝相互干扰的作用机制, 考虑岩石热塑性力学特征, 构建与温度相关的缝周“应力阴影”模型, 形成与温度相关的多缝吸引与排斥扩展判别准则, 确定多缝(缝网)形成及扩展机制, 为高温热储缝网压裂工艺优化提供依据。

6 结论与展望

热储高温加剧了岩石力学特性的复杂度, 传统与温度无关的岩石力学理论适用性有限, 制约了压裂增渗改造干热岩热储的可控性。围绕干热岩压裂的高温岩石力学特性研究, 主要针对热储高温及低温流体接触高温岩石产生温差热冲击 2 种温度作用机制, 聚焦抗压 - 抗拉力学响应特征、断裂特性、高温岩石微结构演化以及压裂裂缝扩展规律 4 个方面, 并在此基础上构建了岩石热塑性力学理论。

热处理花岗岩压剪响应对 200 °C 以上的温度具有敏感性, 呈临界屈服面与强度参数随温度升高而收缩与降低的趋势; 总体上实时高温超过 100 °C 时, 花岗岩三轴压缩应力 - 应变响应变化明显, 初始及临界屈服应力均随温度升高而降低, 表明高温改变了花岗岩初始 - 临界屈服条件, 以及由初始屈

服至临界屈服的热塑性演化特征, 主要归因于微裂缝密度增加, 另有试验发现实时高温提升致使岩石抗压强度先增后降; 而低温热冲击使岩石抗压与抗拉强度近似呈线性降低趋势; 热力损伤力学模型可有效刻画高温热处理岩石的抗压力学特征。

温度提升使岩石线弹性断裂参数——断裂韧性先增后减, 临界温度总体介于 100 °C ~ 200 °C 范围, 归因于高温致裂隙闭合增韧与微裂缝发育弱化岩石的相互竞争; 岩石缝尖具有塑性软化特性的断裂过程区在 150 °C 以上明显随温度增长, 表明高温加剧了岩石断裂的热塑性。

研究发现岩石微结构随温度变化主要呈现为不同类型结合水析出及微裂缝发育 2 种形式, 在此基础上实时高温使花岗岩矿物膨胀而具有压实增韧效应, 上述 3 种机制联合致使岩石强度及断裂参数随温度升高呈现先升高后降低的变化趋势。

干热岩现场压裂以水力剪切为主要手段, 围绕裂缝可控与抑制地震, 循环疲劳压裂与分段多簇压裂得以实践; 压裂物模与数模研究表明低温压裂液热冲击效应会降低起裂压力、诱导起裂提前、致使扩展滞后、激活弱面、改变缝周应力场并利于形成分支缝, 同时压裂缝周存在微裂缝区且其发育特征受温度影响, 表明高温压裂缝扩展具有热塑性力学特征。

在上述认识基础上, 高温岩石的热塑性理论得以构建, 针对压裂缝尖“断裂过程区、两侧微裂缝带及压剪塑性区”所构成的热塑性三区, 建立了热塑性本构建模框架, 将温度引入本构模型并得到应力 - 应变 - 温度本构关系; 以断裂过程区的热塑性软化作为纽带, 融合塑性力学与断裂力学, 构建了热塑性断裂模型, 得到了 7 个热塑性断裂参量综合刻画高温岩石断裂; 聚焦高温压裂缝周微裂缝区提出了 3 个热塑性响应因子, 综合评价压裂裂缝的增渗改造效果。

基于聚焦干热岩压裂的高温岩石力学研究成果, 本文分析了高温岩石力学对干热岩地热工程优化的启示, 并对该领域未来研究的关键挑战与发展方向做出以下展望: 后续研究需深化分析高温岩石边界位移约束下岩石力学特性的热应力依赖性; 进一步厘清热处理与实时高温对岩石力学特性及压裂缝扩展的影响差异, 并将岩石细观参数纳入热塑性本构模型; 需提升热塑性理论与压裂裂缝扩展模型的融合度, 并引入流 - 固 - 热 - 化学 (THMC) 多场耦合模型; 探明高温储层压裂多缝的形成与扩展机制。

致谢 感谢中国矿业大学黄炳香教授在高温岩石热塑性断裂效应研究方面给予的大力支持与指导，感谢中国矿业大学朱振南老师对本稿件中损伤力学模型综述部分的指导。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. NB/T 10097—2018 地热能术语[S]. 北京：国家能源局，2019.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. NB/T 10097—2018 Terminology of geothermal energy[S]. Beijing: National Energy Administration, 2019.(in Chinese))
- [2] 庞忠和，罗 霁，程远志，等. 中国深层地热能开采的地质条件评价[J]. 地学前缘，2020，27(1): 134 - 151.(PANG Zhonghe, LUO Ji, CHENG Yuanzhi, et al. Evaluation of geological conditions for the development of deep geothermal energy in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 134 - 151.(in Chinese))
- [3] 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 Gensheng, WU Xiaoguang, SONG Xianzhi, et al. Status and challenges of hot dry rock geothermal resource exploitation[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 343 - 364.(in Chinese))
- [4] TOMAC I, SAUTER M. A review on challenges in the assessment of geomechanical rock performance for deep geothermal reservoir development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 3 972 - 3 980.
- [5] 陈 臻，关俊朋，王丽娟，等. 增强型地热系统在碳酸盐岩型深层地热能开发利用中的应用进展[J]. 地质学刊，2023，47(2): 216 - 224.(CHEN Zhen, GUAN Junpeng, WANG Lijuan, et al. Progress in the application of enhanced geothermal systems in the exploitation and utilization of deep geothermal energy in carbonate rocks[J]. Journal of Geology, 2023, 47(2): 216 - 224.(in Chinese))
- [6] 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 Jiyang, HU Shengbiao, PANG Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science and Technology Review, 2012, 30(32): 25 - 31.(in Chinese))
- [7] LENG J G, LEI D, LIU X C, et al. Evaluation of the development potential of hot dry rock in Hainan Island[J]. Natural Gas Industry B, 2024, 11(1): 19 - 27.
- [8] QIAO M Z, JING Z F, FENG C C, et al. Review on heat extraction systems of hot dry rock: Classifications, benefits, limitations, research status and future prospects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 196: 114364.
- [9] 赵阳升，万志军，康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京：科学出版社，2004：1 - 10.(ZHAO Yangsheng, WAN Zhijun, KANG Jianrong. Introduction to high-temperature rock geothermal development[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1 - 10.(in Chinese))
- [10] 赵 鹏，朱海燕，李根生，等. 青海共和盆地干热岩注采大尺度物理模拟实验[J]. 石油勘探与开发，2024，51(3): 646 - 654.(ZHAO Peng, ZHU Haiyan, LI Gensheng, et al. Large-scale physical simulation of injection and production of hot dry rock in Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 646 - 654.(in Chinese))
- [11] ZHANG Q, TALEGHANI A D, LI G. Fracture conductivity management to improve heat extraction in enhanced geothermal systems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 218: 124725.
- [12] LU S M. A global review of enhanced geothermal system (EGS)[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2 902 - 2 921.
- [13] OLASOLO P, JUÁREZ M C, MORALES M P, et al. Enhanced geothermal systems (EGS): A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 133 - 144.
- [14] 解经宇，王 丹，李 宁，等. 干热岩压裂建造人工热储发展现状及建议[J]. 地质科技通报，2022，41(3): 321 - 329.(XIE Jingyu, WANG Dan, LI Ning, et al. Development status and suggestions of hot dry rock hydraulic fracturing for building geothermal reservoirs[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3): 321 - 329.(in Chinese))
- [15] 饶 松，黄顺德，胡圣标，等. 中国陆区干热岩勘探靶区优选:来自国内外干热岩系统成因机制的启示[J]. 地球科学，2023，48(3): 857 - 877.(RAO Song, HUANG Shunde, HU Shengbiao, et al. Exploration target selection of hot dry rock in chinese continent: enlightenment from genesis mechanism of global hot dry rock system[J]. Earth Science, 2023, 48(3): 857 - 877.(in Chinese))
- [16] 文冬光，张二勇，王贵玲，等. 干热岩勘查开发进展及展望[J]. 水文地质工程地质，2023，50(4): 1 - 13.(WEN Dongguang, ZHANG Eryong, WANG Guiling, et al. Progress and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2023, 50(4): 1 - 13.(in Chinese))
- [17] ZHU Z N, YANG S Q, RAN J I T H P G, et al. A comprehensive review on mechanical responses of granite in enhanced geothermal systems (EGSs)[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 383: 135378.
- [18] XIE J Y, ZHAO Z G, LI L, et al. Role of natural discontinuities in fracture propagation in hot dry rock: observations and implications from the field injection test[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58: 3 701 - 3 717.
- [19] 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

- Xiaofei, XIAO Yong, SHANGGUAN Shuantong, et al. Fracture propagation mechanism in artificial reservoir of deep hot dry rock, Matouying and its applications[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(6): 224 – 234.(in Chinese))
- [20] ZIMMERMANN G, ZANG A, STEPHANSSON O, et al. Permeability enhancement and fracture development of hydraulic in situ experiments in the äspö hard rock laboratory, sweden[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(2): 495 – 515.
- [21] ZANG A, ZIMMERMANN G, HOFMANN H, et al. How to reduce fluid-injection-induced seismicity[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(2): 475 – 493.
- [22] 孙 伟, 张广清. 变载荷压裂特征研究进展及展望[J]. 石油科学通报, 2025, 10(1): 87 – 106.(SUN Wei, ZHANG Guangqing. Progress and prospects of variable load fracturing characteristics[J]. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(1): 87 – 106.(in Chinese))
- [23] ZHOU Z L, ZHANG G Q, XING Y K, et al. A laboratory study of multiple fracture initiation from perforation clusters by cyclic pumping[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 827 – 840.
- [24] ZHOU Z L, ZHANG G Q, DONG H R, et al. Creating a network of hydraulic fractures by cyclic pumping[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 97: 52 – 63.
- [25] ZHOU X X, LI G S, MA Z C, et al. Fracture initiation and propagation in soft hydraulic fracturing of hot dry rock[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(6): 1 598 – 1 610.
- [26] NORBECK J, LATIMER T M. Commercial-scale demonstration of a first-of-a-kind enhanced geothermal system[J]. EarthArXiv Preprint, 2023, <https://eartharxiv.org/repository/view/5704/>.
- [27] 卢雪梅. 水平井+多段水力压裂技术应用于干热岩开发获突破[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1 064.(LU Xuemei. The application of multi-stage hydraulic fracturing technology in horizontal wells for the development of hot dry rock has achieved breakthroughs[J]. Oil and Gas Geology, 2023, 44(5): 1 064.(in Chinese))
- [28] 姚树青. 美国企业在“增强型地热系统”技术研发与工程示范领域取得的突破性进展正加快该国实现地热发电愿景[OL]. 地调局地学文献中心, 2024, http://www.cgl.cgs.gov.cn/gzdt_4169/dwdt_4172/202410/t20241010_773635.html.(YAO Shuqing. Breakthroughs by U.S. Companies in enhanced geothermal systems technology R&D and project demonstration are accelerating the nation's vision for geothermal power generation[OL]. China Geological Survey Geo-Information Center, 2024, http://www.cgl.cgs.gov.cn/gzdt_4169/dwdt_4172/202410/t20241010_773635.html.(in Chinese))
- [29] MOORE J, ALLIS R, SIMMONS S, et al. Utah FORGE: Final phase 2B topical report[R]. [S. l.]: DOE Geothermal Data Repository, 2018.
- [30] TESTER J W, ANDERSON B J, BATCHELOR A S, et al. The future of geothermal energy-impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century[R]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [31] CHEN Z B, ZHAO F, SUN F, et al. Hydraulic fracturing - induced seismicity at the hot dry rock site of the gonghe basin in China[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2021, 95(6): 1 835 – 1 843.
- [32] GRIGOLI F, CESCO S, RINALDI A P, et al. The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea[J]. Science, 2018, 360(6392): 1 003 – 1 006.
- [33] LEE K K, ELLSWORTH W L, GIARDINI D, et al. Managing injection-induced seismic risks[J]. Science, 2019, 364(6442): 730 – 732.
- [34] 许天福, 姜振蛟, 袁益龙. 中深部地热资源开发利用研究现状与展望[J]. 中国基础科学, 2023, 25(3): 11 – 22.(XU Tianfu, JIANG Zhenjiao, YUAN Yilong, et al. Research status and prospects of middle and deep geothermal resources exploitation and utilization[J]. China Basic Science, 2023, 25(3): 11 – 22.(in Chinese))
- [35] ZHANG Y L, ZHAO G F. A global review of deep geothermal energy exploration: from a view of rock mechanics and engineering[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2020, 6(1): 4.
- [36] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1 – 16.(XIE Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1 – 16.(in Chinese))
- [37] ZHOU H Y, LIU Z B, SHEN W Q, 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.
- [38] WANG C, LIU Z B, ZHOU H Y, et al. A novel true triaxial test device with a high-temperature module for thermal-mechanical property characterization of hard rocks[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, 27(4): 1 697 – 1 714.
- [39] 邵保平, 吴阳春, 王 帅, 等. 青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 69 – 83.(XIA Baoping, WU Yangchun, WANG Shuai, et al. Experimental study on mechanical properties of granite taken from Gonghe basin, Qinghai province after high temperature thermal damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 69 – 83.(in Chinese))
- [40] XU X L, KARAKUS M. A coupled thermo-mechanical damage model for granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 195 – 204.
- [41] WANG K X, LIU Z B, WU M, et al. Experimental study of mechanical

- properties of hot dry granite under thermal-mechanical couplings[J]. *Geothermics*, 2024, 119: 102974.
- [42] WANG F, KONIETZKY H. Thermo-mechanical properties of granite at elevated temperatures and numerical simulation of thermal cracking[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(10): 3 737 – 3 755.
- [43] ZHAO Z. Thermal influence on mechanical properties of granite: a microcracking perspective[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 747 – 762.
- [44] ZHANG W Q, SUN Q, HAO S Q, et al. Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 98: 1 297 – 1 304.
- [45] 黄彦华, 张坤博, 杨圣奇, 等. 高温后花岗岩微观特征及其对强度影响规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2025, 44(2): 359 – 372.(HUANG Yanhua, ZHANG Kunbo, YANG Shengqi, et al. Study on the microstructure characteristic and its influence on strength properties of granite specimens after high temperature treatment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2025, 44(2): 359 – 372.(in Chinese))
- [46] JIN P H, HU Y Q, SHAO J X, et al. Influence of different thermal cycling treatments on the physical, mechanical and transport properties of granite[J]. *Geothermics*, 2019, 78: 118 – 128.
- [47] LU J, JIANG W, PAN J F, et al. Triaxial permeability behaviors and structural damage evolution of deep hot dry rock under different cooling stimulation[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2025, 251: 213896.
- [48] SHAO S S, RANJITH P G, WASANTHA P L P, et al. Experimental and numerical studies on the mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite at high temperatures: An application to geothermal energy[J]. *Geothermics*, 2015, 54: 96 – 108.
- [49] LIU Z B, WANG C, ZHANG M S, et al. Cracking property and brittleness evaluation of granite under high-temperature true triaxial compression in geothermal systems[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9: 99.
- [50] MENG T, LIU Z B, WU F B, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of porous rocks: Candidate of surrounding rocks for deep geological repositories[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2025, 17: 3 073 – 3 092.
- [51] MAX, WANG G L, HU D W, 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.
- [52] MAX, DONG W B, HU D W, et al. Mechanical properties of granite at high temperature subjected to true triaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 164: 105313.
- [53] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(3): 332 – 335.(XU Xichang, LIU Qiongsheng. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 332 – 335.(in Chinese))
- [54] YIN W T, FENG Z J, ZHAO Y S. Effect of grain size on the mechanical behaviour of granite under high temperature and triaxial stresses[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54: 745 – 758.
- [55] 张洪伟, 王志军, 周长冰, 等. 干热岩高温力学特性及热冲击效应分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(1): 138 – 145.(ZHANG Hongwei, WAN Zhijun, ZHOU Changbing, et al. High temperature mechanical properties and thermal shock effect of hot dry rock[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(1): 138 – 145.(in Chinese))
- [56] ZHU C, ARSON C. A thermo-mechanical damage model for rock stiffness during anisotropic crack opening and closure[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(5): 847 – 867.
- [57] ZHU S, ZHENG J H, ZHOU L M, et al. Study on the statistical damage constitutive model and experiment of hot dry rock cyclic heating-cooling based on the octahedral strength criterion[J]. *Geothermics*, 2025, 126: 103210.
- [58] 朱振南, 蒋国盛, 田 红, 等. 基于 Normal 分布的岩石统计热损伤本构模型研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2019, 50(6): 1 411 – 1 418.(ZHU Zhennan, JIANG Guoshen, TIAN Hong, et al. Study on statistical thermal damage constitutive model of rock based on normal distribution[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2019, 50(6): 1 411 – 1 418.(in Chinese))
- [59] ZHENG Y N, JIA C J, ZHANG S, et al. Experimental and constitutive modeling of the anisotropic mechanical properties of shale subjected to thermal treatment[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2023, 35: 100485.
- [60] QIU J, ZHAO Z Y, YANG J B, et al. Theoretical characterization of the temperature - dependent mode I fracture toughness of rocks[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2024, 47(3): 952 – 963.
- [61] ATKINSON B K. Subcritical crack growth in geological materials[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B6): 4 077 – 4 114.
- [62] MEREDITH P G, ATKINSON B K. Fracture toughness and subcritical crack growth during high-temperature tensile deformation of Westerly granite and Black gabbro[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*,

- 1985, 39(1): 33 – 51.
- [63] HU Y F, HU Y Q, JIN P H, et al. Real-time mode-I fracture toughness and fracture characteristics of granite from 20 °C to 600 °C [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 277: 109001.
- [64] BALME M R, ROCCHI V, JONES C, et al. Fracture toughness measurements on igneous rocks using a high-pressure, high-temperature rock fracture mechanics cell[J]. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 2004, 132(2 – 3): 159 – 172.
- [65] RAO Q H, WANG Z, XIE H F, et al. Experimental study of mechanical properties of sandstone at high temperature[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(Supp.1): 478 – 483.
- [66] 王靖涛, 赵爱国, 黄明昌. 花岗岩断裂韧度的高温效应[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(6): 113 – 119.(WANG Jingtao, ZHAO Aiguo, HUANG Mingchang. Effect of high temperature on the fracture toughness of granite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(6): 113 – 119.(in Chinese))
- [67] MIAO S T, PAN P Z, YU P Y, et al. Fracture analysis of Beishan granite after high-temperature treatment using digital image correlation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 225: 106847.
- [68] WU J W, GAO J W, FENG Z J, et al. Investigation of fracture process zone properties of mode I fracture in heat-treated granite through digital image correlation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 235: 107192.
- [69] XING Y K, YU Y, HUANG B X, et al. Thermoplastic fracture characteristics of granite suffering thermal shocks[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 127: 104099.
- [70] XU J J, ZHANG Y H, RUTQVIST J, et al. Thermally induced microcracks in granite and their effect on the macroscale mechanical behavior[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2023, 128(1): e2022JB024920.
- [71] ZHAO Z H, XU H R, WANG J, et al. Auxetic behavior of Beishan granite after thermal treatment: A microcracking perspective. Engineering Fracture Mechanics[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 231: 107017.
- [72] SUN Q, ZHANG W Q, ZHU Y M, et al. Effect of high temperatures on the thermal properties of granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(8): 2 691 – 2 699.
- [73] LI N, ZHANG S C, MA X F, et al. Thermal effect on the evolution of hydraulic fracture conductivity: An experimental study of enhanced geothermal system[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 187: 106814.
- [74] FAN L F, WU Z J, WAN Z, et al. Experimental investigation of thermal effects on dynamic behavior of granite[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 94 – 103.
- [75] FAN L F, GAO J W, WU Z J, et al. An investigation of thermal effects on micro-properties of granite by X-ray CT technique[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 505 – 519.
- [76] TIAN H, KEMPKAT, XU N X, et al. Physical properties of sandstones after high temperature treatment[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(6): 1 113 – 1 117.
- [77] WONG L N Y, ZHANG Y H, CUI X, et al. Thermal effect on rock strength: strengthening-weakening transition explored by grain-based model[J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(6): 3 321 – 3 336.
- [78] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Hydraulic fracturing under high temperature and pressure conditions with micro CT applications: Geothermal energy from hot dry rocks[J]. Fuel, 2018, 230: 138 – 154.
- [79] XING Y K, ZHANG G Q, LUO T Y, et al. Hydraulic fracturing in high-temperature granite characterized by acoustic emission[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 178: 475 – 484.
- [80] HUANG Z W, ZHANG S K, YANG R Y, et al. A review of liquid nitrogen fracturing technology[J]. Fuel, 2020, 266: 117040.
- [81] ZHANG S K, HUANG Z W, HUANG P P, et al. Numerical and experimental analysis of hot dry rock fracturing stimulation with high-pressure abrasive liquid nitrogen jet[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 163: 156 – 165.
- [82] YANG R Y, HUANG Z W, SHI Y, et al. Laboratory investigation on cryogenic fracturing of hot dry rock under triaxial-confining stresses[J]. Geothermics, 2019, 79: 46 – 60.
- [83] YANG Y, HU D W, WANG H Z, et al. Experimental study on Sc-CO₂ fracturing of granite under real-time high temperature and true triaxial stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 183: 105889.
- [84] ZHOU Z, JIN Y, ZENG Y J, et al. Investigation on fracture creation in hot dry rock geothermal formations of China during hydraulic fracturing[J]. Renewable Energy, 2020, 153: 301 – 313.
- [85] 郭天魁, 王继伟, 翟成, 等. 热应力和天然裂缝影响下干热岩水力裂缝扩展机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 44(4): 810 – 826.(GUO Tiankui, WANG Jiwei, ZHAI Cheng, et al. Mechanism of hydraulic fracture propagation in hot dry rocks under the influence of thermal stress and natural fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 44(4): 810 – 826.(in Chinese))
- [86] LI S B, ZHANG D X. Three-dimensional thermoporoelastic modeling of hydrofracturing and fluid circulation in hot dry rock[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2023, 128(2): e2022JB025673.
- [87] ZHANG B, GUO T K, QU Z Q, et al. Numerical simulation of fracture propagation and production performance in a fractured geothermal reservoir using a 2D FEM-based THMD coupling model[J]. Energy,

- 2023, 273: 127175.
- [88] HE Y T, GUO Y T, BI Z H, et al. Study of field-scale carbon dioxide fracturing in hot dry rock reservoir based on a new 3D-THM coupled discrete block model[J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2025: 213675.
- [89] WANG H W, JIN X P, LIU H J, et al. Numerical investigations on the damage evolution in hot dry rocks with natural fractures induced by hydraulic stimulation[J]. *Geothermics*, 2024, 123: 103114.
- [90] SHARAFISAF A M, ALIABADIAN Z, SATO A, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical simulation of hydraulic fracturing in deep reservoirs using finite-discrete element method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(7): 5 039 - 5 075.
- [91] ZHANG X, JEFFREY R G, WU B S. Mechanics of edge crack growth under transient pressure and temperature conditions[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 69: 11 - 22.
- [92] ABUAISHAM, LORET B, EATON D. Enhanced Geothermal Systems (EGS): Hydraulic fracturing in a thermo-poroelastic framework[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 146: 1 179 - 1 191.
- [93] XING Y K, ZHANG G Q, HUANG B X. Recent advances in nonlinear fracturing characteristics of the hydraulic fracture in the deep reservoir[C]// IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. [S. l.]: IOP Publishing, 2020, 570(3): 032062.
- [94] XING Y K, ZHANG G Q, LI S Y. Thermoplastic constitutive modeling of shale based on temperature-dependent Drucker-Prager plasticity[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 130: 104305.
- [95] XING Y K, HUANG B X. Thermoplastic cohesive fracturing model of thermally-treated granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 148: 104974.
- [96] 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]. *地下工程与空间学报*, 2020, 16(1): 114 - 121.(LU Yunhu, WANG Shiyong, CHEN Mian, et al. Experimental study on mechanical properties of hot dry rock[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(1): 114 - 121.(in Chinese))
- [97] XU Z H, ZHONG X P, ZHANG S L, et al. Experimental study on mechanical damage and creep characteristics of Gonghe granite under real-time high temperature[J]. *Geothermics*, 2024, 123: 103100.
- [98] ISAKA B L A, GAMAGE R P, RATHNAWEERA T D, et al. An influence of thermally-induced micro-cracking under cooling treatments: mechanical characteristics of Australian granite[J]. *Energies*, 2018, 11(6): 1 338.
- [99] ZHU Z N, KEMPKA T, RANJITH P G, et al. Changes in thermomechanical properties due to air and water cooling of hot dry granite rocks under unconfined compression[J]. *Renewable Energy*, 2021, 170: 562 - 573.
- [100] PAN P Z, SHAO C Y. Experimental studies on the physical and mechanical properties of heated rock by air, water and high-viscosity fluid cooling[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2022, 31: 100315.
- [101] LIU Z B, SUN Y, JIA Y, et al. Experimental investigation of mechanical behavior and thermal damage of hot dry rock exposing to different cooling conditions[J]. *Geothermics*, 2025, 130: 103332.
- [102] DONG L J, ZHANG Y H, WANG L C, et al. Temperature dependence of mechanical properties and damage evolution of hot dry rocks under rapid cooling[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(2): 645 - 660.
- [103] SHAO S, WASANTHA P L P, RANJITH P G, et al. Effect of cooling rate on the mechanical behavior of heated Strathbogie granite with different grain sizes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70: 381 - 387.
- [104] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Temperature-dependent mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite with different cooling treatments[J]. *Engineering Geology*, 2017, 229: 31 - 44.
- [105] GE Z L, SUN Q. Acoustic emission (AE) characteristics of granite after heating and cooling cycles[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 200: 418 - 429.
- [106] ZHU D, JING H W, YIN Q, et al. Experimental study on the damage of granite by acoustic emission after cyclic heating and cooling with circulating water[J]. *Processes*, 2018, 6(8): 101.
- [107] 陈 宇, 徐能雄, 秦 严, 等. 高温花岗岩遇水快速冷却后力学性质实验研究[J]. *力学与实践*, 2019, 41(2): 171 - 177.(CHEN Yu, XU Nengxiong, QIN Yan, et al. Experimental study of mechanical properties of water-cooled granite under high temperature[J]. *Mechanics in Engineering*, 2019, 41(2): 171 - 177.(in Chinese))
- [108] 崔翰博, 唐巨鹏, 姜昕彤. 自然冷却和遇水冷却后高温花岗岩力学特性试验研究[J]. *固体力学学报*, 2019, 40(6): 571 - 582.(CUI Hanbo, TANG Jupeng, JIANG Xintong, et al. Experimental study on mechanical and acoustic characteristics of high-temperature granite after natural cooling and water cooling[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2019, 40(6): 571 - 582.(in Chinese))
- [109] LI C, HU Y Q, MENG T, et al. Experimental study of the influence of temperature and cooling method on mechanical properties of granite: implication for geothermal mining[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(5): 1 716 - 1 728.
- [110] 邵保平, 吴阳春, 赵阳升, 等. 不同冷却模式下花岗岩强度对比与热破坏能力表征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(2):

- 286 – 300.(XI Baoping, WU Yangchun, ZHAO Yangsheng, et al. Experimental investigations of compressive strength and thermal damage capacity characterization of granite under different cooling modes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 286 – 300.(in Chinese))
- [111] ZHU Z N, TIAN H, MEI G, et al. Experimental investigation on physical and mechanical properties of thermal cycling granite by water cooling[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15: 1 881 – 1 893.
- [112] HAN H F, PENG J L, GUO Y T, et al. Experimental research on the mechanical properties of heated granite after rapid cooling[J]. Journal of Engineering, 2021, 2021(1): 8838520.
- [113] 贾 蓬, 杨其要, 刘冬桥, 等. 高温花岗岩水冷却后物理力学特性及微观破裂特征[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1 568 – 1 578.(JIA Peng, YANG Qiyao, LIU Dongqiao, et al. Physical and mechanical properties and related microscopic characteristics of high-temperature granite after water-cooling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1 568 – 1 578.(in Chinese))
- [114] KANG F C, JIA T R, LI Y C, et al. Experimental study on the physical and mechanical variations of hot granite under different cooling treatments[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 1 316 – 1 328.
- [115] XIAO P, ZHENG J, DOU B, et al. Mechanical behaviors of granite after thermal shock with different cooling rates[J]. Energies, 2021, 14(13): 3 721.
- [116] YANG Z, YANG S Q, TIAN W L. Peridynamic simulation of fracture mechanical behaviour of granite specimen under real-time temperature and post-temperature treatments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104573.
- [117] ZHANG F, DAI C, ZHANG Y H, et al. Experimental investigations on the tensile behaviour of granite after heating and water-cooling treatment[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(7): 5 909 – 5 920.
- [118] SHAO Z L, WANG Y, TANG X H. The influences of heating and uniaxial loading on granite subjected to liquid nitrogen cooling[J]. Engineering geology, 2020, 271: 105614.
- [119] WANG T Z, WANG L X, XUE F, et al. Investigation of the mechanical and permeability evolution effects of high-temperature granite exposed to a rapid cooling shock with liquid nitrogen[J]. Geofluids, 2021, 2021(1): 3243243.
- [120] CHEN Z H, SHA S, XU L D, et al. Damage evaluation and statistic constitutive model of high-temperature granites subjected to liquid nitrogen cold shock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(4): 2 299 – 2 321.
- [121] 邵保平, 赵阳升. 600 °C 内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 892 – 898.(XI Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600 °C [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 892 – 898.(in Chinese))
- [122] 梁 铭, 张绍和, 舒 彪. 不同冷却方式对高温花岗岩巴西劈裂特性的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 186 – 193.(LIANG Ming, ZHANG Shaohe, SHU Biao. Effect of different cooling ways on Brazilian tension characteristics of heat-treated granite[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(2): 186 – 193.(in Chinese))
- [123] KUMARI W G P, BEAUMONT D M, RANJITH P G, et al. An experimental study on tensile characteristics of granite rocks exposed to different high-temperature treatments[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2019, 5: 47 – 64.
- [124] WU Q H, WENG L, ZHAO Y L, et al. On the tensile mechanical characteristics of fine-grained granite after heating/cooling treatments with different cooling rates[J]. Engineering Geology, 2019, 253: 94 – 110.
- [125] WU X G, HUANG Z W, SONG H Y, et al. Variations of physical and mechanical properties of heated granite after rapid cooling with liquid nitrogen[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 2 123 – 2 139.
- [126] CUI H B, TANG J P, JIANG X T. Effects of different conditions of water cooling at high temperature on the tensile strength and split surface roughness characteristics of hot dry rock[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 8868140.
- [127] DENG L C, LI X Z, WU Y, et al. Mechanical damage characteristics of granite with different cooling methods[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 187 – 199.
- [128] TIAN H, ZHU Z N, RANJITH P G, et al. Experimental investigation of drill ability indices of thermal granite after water-cooling treatment[J]. Natural Resources Research, 2021, 30: 4 621 – 4 640.
- [129] ZHU Z N, TIAN H, CHEN J, et al. Experimental investigation of thermal cycling effect on physical and mechanical properties of heated granite after water cooling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79: 2 457 – 2 465.
- [130] PENG K, LV H, YAN F Z, et al. Effects of temperature on mechanical properties of granite under different fracture modes[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 226: 106838.
- [131] ZUO J P, LI Y L, ZHANG X Y, et al. The effects of thermal treatments on the subcritical crack growth of Pingdingshan sandstone at elevated high temperatures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(11): 3 439 – 3 454.
- [132] WANG Q Y, WANG D B, LI X H, et al. Experimental investigation

- on the elastic-plastic failure evolution mechanism of high-temperature hot dry rocks using combined monitoring of acoustic emission and digital image correlation[J]. *Geothermics*, 2025, 131: 103359.
- [133] YUAN H H, SUN Q, HU J J, et al. Characterization of real-time thermal response during rupture of hot dry rock under the shock of liquid Nitrogen circulation[J]. *Geothermics*, 2025, 130: 103346.
- [134] SUN Y, ZHAI C, YU X, et al. Pore structure and damage evaluation of hot dry rocks in enhanced geothermal system by combining electrical resistivity, ultrasonic waves and nuclear magnetic resonance[J]. *Natural Resources Research*, 2023, 32(4): 1 559 – 1 578.
- [135] HU L B, GHASSEMI A. Heat production from lab-scale enhanced geothermal systems in granite and gabbro[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 126: 104205.
- [136] WU X G, HUANG Z W, CHENG Z, et al. Effects of cyclic heating and LN₂-cooling on the physical and mechanical properties of granite[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 99 – 110.
- [137] LI N, ZHANG S C, MA X F, et al. Temperature-dependency of mechanical properties of hydraulic fracture surface and its influence on conductivity: an experimental study for development of geothermal energy[C]// *Proceedings of the ARMA-CUPB Geothermal International Conference*. [S. l.]: American Rock Mechanics Association, 2019: ARMA-CUPB-19-7257.
- [138] JIANG H P, JIANG A N, XU M F. Research on algorithm and coupling damage model of rock under high temperature and loading based on Mohr–Coulomb criterion[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2022, 19(4): 2250001.
- [139] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80(2): 233 – 245.
- [140] JIANG H P, JIANG A N, YANG X R, et al. Experimental investigation and statistical damage constitutive model on layered slate under thermal-mechanical condition[J]. *Natural Resources Research*, 2022, 31(1): 443 – 461.
- [141] PAN J L, ZHANG Y, LI P, et al. Mechanical properties and thermo-chemical damage constitutive model of granite subjected to thermal and chemical treatments under uniaxial compression[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 390: 131755.
- [142] 秦 严. 高温后花岗岩物理力学性质试验研究[硕士学位论文][D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.(QIN Yan. High-temperature influence on physical and mechanical properties of diorite[M. S. Thesis][D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.(in Chinses))
- [143] OTTOSEN N S, RISTINMAA M. The mechanics of constitutive modeling[M]. [S.l.]: Elsevier, 2005: 247 – 261.
- [144] RISTINMAA M, WALLIN M, OTTOSEN N S. Thermodynamic format and heat generation of isotropic hardening plasticity[J]. *Acta Mechanica*, 2007, 194(1/4): 103 – 121.
- [145] 邢岳堃, 韩泰森, 徐 杭, 等. 高温高压真三轴压裂物理模拟实验系统[P]. 中国: ZL202510127194.X, 2025 – 10 – 10.(XING Yuekun, HAN Taisen, XU Hang, et al. True Triaxial fracturing physical simulation system under high temperature and high pressure[P]. China: ZL202510127194.X, 2025 – 10 – 10.(in Chinese))
- [146] 谭 鹏, 邢岳堃, 韩泰森, 等. 复杂断裂下多簇水力裂缝非均匀扩展的物理模拟实验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2025, 44(3): 1 514 – 1 526.(TAN Peng, XING Yuekun, HAN Taisen, et al. Physical simulation experiments on non-uniform extension of multi-cluster hydraulic fractures under complex fracturing conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2025, 44(3): 1 514 – 1 526.(in Chinese))
- [147] 马 啸, 马东东, 胡大伟, 等. 实时高温真三轴试验系统的研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(8): 1 605 – 1 614.(MA Xiao, MA Dongdong, HU Dawei, et al. A real-time high-temperature true triaxial test system and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(8): 1 605 – 1 614.(in Chinese))
- [148] TAN P, PANG H W, JIN Y, et al. Experiments and analysis of hydraulic fracturing in hot dry rock geothermal reservoirs using an improved large-size high-temperature true triaxial apparatus[J]. *Natural Gas Industry B*, 2024, 11(1): 83 – 94.
- [149] CHENG Y X, ZHANG Y J, YU Z W, et al. Investigation on reservoir stimulation characteristics in hot dry rock geothermal formations of China during hydraulic fracturing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(8): 3 817 – 3 845.
- [150] XIE Z X, HUANG Z W, SUN Z W, et al. The interaction behaviors between the hydraulic fracture and natural fracture in hot dry rock[J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2025: 213731.
- [151] MA X, HU D W, MA D D, et al. A shear-based breakdown model for the hydraulic fracturing of hot dry rock[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, 320: 111070.
- [152] SUN Y, ZHAI C, XU J Z, et al. Damage and failure of hot dry rock under cyclic liquid nitrogen cold shock treatment: A non-destructive ultrasonic test method[J]. *Natural Resources Research*, 2022, 31(1): 261 – 279.
- [153] HUO T W, WANG D B, ZHU H Y, et al. Experimental study on the elastic-plastic deformation and damage failure mechanism of hot dry rock after alternating temperature loading(unconfined pressure condition) pretreatment[J]. *SPE Journal*, 2025, 30(5): 2 686 – 2 706.
- [154] ISAKA B L A, RANJITH P G, RATHNAWEERA T D, et al. Testing the frack ability of granite using supercritical carbon dioxide: Insights into geothermal energy systems[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2019,

- 34: 180 – 197.
- [155] YIN W T, FENG Z J, ZHAO Y S. Effect of fracture backfill on the hydraulic fracturing behaviour of deep granite under high-temperature and high-pressure conditions: Implications for hot dry rock geothermal mining[J]. *Renewable Energy*, 2025, 243: 122507.
- [156] JEANNE P, RUTQVIST J, DOBSON P F, et al. Geomechanical simulation of the stress tensor rotation caused by injection of cold water in a deep geothermal reservoir[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2015, 120(12): 8 422 – 8 438.
- [157] GHASSEMI A, TARASOV S, CHENG H D. A 3-D study of the effects of thermomechanical loads on fracture slip in enhanced geothermal reservoirs[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(8): 1 132 – 1 148.
- [158] LABUZ J F, SHAH S P, DOWDING C H. The fracture process zone in granite: evidence and effect[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1987, 24(4): 235 – 246.
- [159] BAŽANT Z P. Concrete fracture models: testing and practice[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002, 69(2): 165 – 205.
- [160] ZHANG G Q, XING Y K, WANG L L. Comprehensive sandstone fracturing characterization: Integration of fiber Bragg grating, digital imaging correlation and acoustic emission measurements[J]. *Engineering Geology*, 2018, 246: 45 – 56.
- [161] XING Y K, ZHANG G Q, WAN B, et al. Subcritical fracturing of sandstone characterized by the acoustic emission energy[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 2 459 – 2 469.
- [162] XING Y K, HUANG B X, ZHANG G Q, et al. Identifying the real fracture hidden in rock microcrack zone by acoustic emission energy[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 34(6): 731 – 746.
- [163] 邢岳堃, 黄炳香, 陈大勇, 等. 压裂裂缝非线性断裂的声发射全波形多参量监测[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3 470 – 3 487.(XING Yuekun, HUANG Bingxiang, CHEN Dayong, et al. Nonlinear fracturing characterization of hydraulic fracture: Utilizing full-waveform and multi-parameter analysis method of acoustic emission[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3 470 – 3 487.(in Chinese))
- [164] MEDLIN W L, MASSE L. Plasticity effects in hydraulic fracturing[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1986, 38(9): 995 – 1 006.
- [165] 唐梅荣, 张广清, 陈磊. 压缩应力作用下 I 型裂缝前端拉压分区特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(2): 322 – 332.(TANG Meirong, ZHANG Guangqing, CHEN Lei. Experimental investigation on tension zone in front of mode-I fracture under in-situ stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(2): 322 – 332.(in Chinese))
- [166] LEE D, CARDIFF P, BRYANTE C, et al. A new model for hydraulic fracture growth in unconsolidated sands with plasticity and leak-off[C]// *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas: [s. n.], 2015: SPE – 174818 – MS.
- [167] LIN Q, LABUZ J F. Fracture of sandstone characterized by digital image correlation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60: 235 – 245.
- [168] MASRI M, SIBAI M, SHAO J F, et al. Experimental investigation of the effect of temperature on the mechanical behavior of Tournemire shale[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70: 185 – 191.
- [169] 邢岳堃. 深部地层岩石热塑性断裂模型及应用[博士学位论文][D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.(XING Yuekun. Thermoplastic fracture model for rock in deep formations and its applications[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.(in Chinese))
- [170] 邢岳堃, 黄炳香, 余洋, 等. 深部高温储层多级多尺度缝网压裂方法[P]. 中国: 202410217051.3, 2024 – 05 – 07.(XING Yuekun, HUANG Bingxiang, YU Yang, et al. Multi-stage and multi-scale fracture network fracturing method for deep high-temperature reservoirs[P]. China: 202410217051.3, 2024 – 05 – 07.(in Chinese))