

特邀稿件

力学化学耦合的硬脆性泥页岩微裂纹扩展机理研究进展与思考

金衍^{1,2*}, 张亚洲^{1,2}, 卢运虎^{1,2}

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

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

* 通信作者, jiny@cup.edu.cn

收稿日期 2023-09-21

国家自然科学基金项目“深层脆性页岩井壁失稳的化学断裂机理与控制研究”(52074314)资助

摘要 储层岩石微裂纹等缺陷在化学力学环境中的时序演变, 是造成岩石强度劣化乃至宏观断裂失稳的关键原因。探究微裂纹扩展诱导损伤演化、损伤积累诱发失稳破坏这一跨尺度行为的发展过程, 对保障井壁围岩稳定性、高效地勘探开发油气资源具有重要意义。首先介绍了岩石中微裂纹扩展的3类基本行为与特征, 并提出页岩的水化过程即为内部微裂纹不断发生更加活跃地亚临界扩展这一机制, 井壁围岩的垮塌失稳更多地表现为微裂纹从亚临界扩展到动态断裂的时序损伤演化。基于这一认识, 在井壁稳定研究中, 为揭示岩石内部微裂纹在化学力学耦合下的亚临界断裂机理, 定量表征损伤演化过程和失稳突变行为, 团队提出了“化学断裂”这一力学概念, 内容聚焦于化学力学环境中微裂纹扩展的断裂力学理论, 以及岩石力学参数对结构损伤演化特征的响应规律。然后分别从理论模型和试验测试2个角度, 对岩石化学力学耦合的微裂纹亚临界断裂机理的研究现状进行了梳理与总结。最后列出了当前研究工作中所面临的几个具体问题与挑战, 并阐述了化学力学环境中脆性岩石微裂纹扩展演化和断裂机制的新思考与展望。

关键词 井壁稳定; 力化耦合; 亚临界扩展; 化学断裂力学

Progress and reflections on the microcrack growth mechanism of hard-brittle shale under chemical-mechanical couplings

JIN Yan^{1,2}, ZHANG Yazhou^{1,2}, LU Yunhu^{1,2}

1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The temporal evolution of reservoir rock microcracks and other defects in the chemical-mechanical environment is the key issue causing rock strength deterioration and even macroscopic fracturing. It is of great significance to explore the development process of the cross-scale behavior of damage evolution induced by microcrack growth and destabilization damage induced by damage accumulation to ensure the stability of rocks surrounding the wellbore to efficiently explore and develop oil and gas resources. Firstly, three basic behaviors and characteristics of microcrack growth in rocks are introduced, and it is proposed that the hydration process of shale is the mechanism by which the internal microcracks continuously undergo more

引用格式: 金衍, 张亚洲, 卢运虎. 力学化学耦合的硬脆性泥页岩微裂纹扩展机理研究进展与思考. 石油科学通报, 2023, 05: 577-587

JIN Yan, ZHANG Yazhou, LU Yunhu. Progress and reflections on the microcrack growth mechanism of hard-brittle shale under chemical-mechanical couplings. Petroleum Science Bulletin, 2023, 05: 577-587. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.05.055

active subcritical growth, and the collapse instability of rocks surrounding the wellbore is more often manifested as the time-sequential damage evolution of microcracks from subcritical growth to dynamic fracture. Based on this understanding of the study of wellbore stability, in order to reveal the subcritical fracture mechanism of microcracks in rock under chemical-mechanical coupling, and to quantitatively characterize the damage evolution process and destabilizing mutation behaviors, the research team proposes the concept of "Chemical Fracture", which focuses on the fracture mechanics theory of microcrack growth in a chemical-mechanical environment, and the response of rock mechanical parameters to the structural damage evolution. Then the current research status of the subcritical fracture mechanism of rock chemical-mechanical coupled microcracks is summarized from the perspectives of theoretical modeling and experimental testing, respectively. Finally, several specific problems and challenges faced in the current research work are listed, and new thoughts and perspectives into microcrack growth evolution and fracture mechanisms of brittle rocks in chemical-mechanical environments are elaborated.

Keywords wellbore stability; chemical-mechanical coupling; subcritical crack growth; chemical fracture mechanics

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.05.055

0 引言

在泥页岩储层的油气钻井过程中, 井壁围岩时常出现垮塌、掉块等复杂情况。由此产生的井壁失稳问题一直困扰着石油工业界, 迟迟未得到彻底解决, 而对于深部硬脆性泥页岩储层来说更是如此^[1-6]。从国内外数百口井的统计结果来看, 至少 90% 的井壁垮塌都发生在泥页岩地层, 而硬脆性泥页岩几乎占据了其中的三分之二。因此, 对硬脆性泥页岩地层井壁稳定性的研究具有十分重要的意义。常规的试验方法仅能对高含蒙脱石的软泥页岩水化膨胀行为实现很好地评价, 但当其应用于富含伊利石、微裂纹发育、水化分散特征主导的硬脆性泥页岩时, 适用性较差且实验结果不理想^[7], 难以有效评价和指导钻井液体系和井壁稳定设计。

硬脆性泥页岩地层井壁失稳至今没有得到充分解决的关键在于其内部的复杂结构以及外部的力学化学环境的综合作用。一般认为, 硬脆性泥页岩内部发育大量微裂纹等结构缺陷, 钻井流体在毛细管力和压差驱动下侵入微裂纹并到达地层内部, 与微裂纹壁面及尖端区域发生复杂的物理化学反应, 并促进内部矿物的水化, 进一步诱发微裂纹的萌生、扩展与相互贯通, 产生结构的多尺度损伤、散裂、剥落, 造成宏观的强度劣化和最终的失稳破坏。

对页岩吸水后水化和强度降低的研究是自 20 世纪 60 年代以来地质工作者和工程专家对岩石的认知不断积累和深化而逐渐发展完善的, 并首次报道于 Chenevert 在 1970 年发表在 SPE-Journal of Petroleum Technology 上的一项研究^[8]。他选取的 50 块不同类型的页岩样品来自于不超过 5000 m 的不同深度的地层, 详细探究了不同围压下蒙脱石型、伊利石型和绿泥石型页岩在与水接触后的变形行为和力学性质变化。结

果表明, 所有类型的页岩对水均有力学响应, 三轴抗压强度随吸水率的增加而近似线性降低。但是他没有揭示页岩吸水后强度劣化的微观机理。自此之后, 更多学者对页岩吸水后的微观结构变化以及宏观强度劣化进行了更加细致的探究, 均得到了页岩浸水后力学参数降低和微裂纹进一步扩展演化的一致结论。特别地, 自 20 世纪初期建立起来的 CT 成像技术逐渐发展为一种能有效观察和表征页岩内部微观结构变化的有力手段。石秉忠等^[9]对川西地区须家河组三段的硬脆性泥页岩样品的水化过程进行了详细的监测, 有效捕捉到了页岩水化中微裂纹时序演化直到贯通破坏的整体过程, 为微裂纹扩展诱导结构劣化并引发宏观井壁失稳这一认识提供了有力证据。可是, 他们没有详细阐述水化过程中微裂纹扩展速率的演化情况。实际上, 可以发现, 水化过程中微裂纹的扩展是十分缓慢的, 特征的数量级约在 10^{-8} m/s, 并且会随着外部物理化学环境的差异而动态改变, 这一现象在断裂力学中称作裂纹的亚临界扩展^[10]。可以想象, 硬脆性泥页岩的水化过程, 能进一步促进内部微裂纹在力学化学耦合作用下的缓慢的亚临界扩展, 微裂纹的不断扩展诱导结构的损伤演化和强度参数的降低, 并最终引发整体的动态失稳断裂。

可以说, 岩石与流体之间的相互作用是造成结构内部微裂纹不断扩展和演化的重要原因, 而微裂纹在这一力学化学耦合作用下的亚临界扩展是引起结构损伤积累和强度劣化的关键。因此, 揭示力学化学耦合作用下微裂纹的亚临界扩展行为与断裂机理显得尤为重要。

针对这一问题, 国内外的学者主要从理论推导和室内实验两个方面开展了大量研究工作, 尝试通过结合微观机理建模和影响因素评价, 搭建物理化学环境、力学载荷与岩石亚临界扩展行为之间的桥梁, 为理论

研究和工程实践提供借鉴和指导^[11-12]。然而,目前的研究仍未能完全定量、充分地解释泥页岩的断裂行为与机理,尤其是对以水化分散特征为主的深部硬脆性泥页岩井壁稳定问题就更加捉襟见肘。本文对多角度下岩石力学化学耦合的微裂纹扩展行为与断裂机理研究现状进行了梳理与总结,列出了当前研究工作中所面临的几个具体问题与挑战,阐述了化学环境中脆性岩石微裂纹扩展演化和断裂机制的新思考与展望。

1 岩石中微裂纹扩展的基本行为与特征

一般而言,地下储层的岩石大都被含有一定矿化度的流体所不同程度地充填,在外加应力的扰动下,或者是外来流体的侵入时,会发生化学力学耦合的变形损伤直至断裂破坏。岩石断裂的物理过程可进一步被描述为介质内部微裂纹在力学载荷和理化环境中的持续萌生、扩展和贯通这一损伤特征的时序演化。特别是钻井流体会与泥页岩储层中的黏土矿物发生复杂的相互作用,侵入岩石内部的微裂纹引起进一步的损伤与断裂,导致裂纹更加活跃地扩展,较大程度地提升微裂纹的扩展速率,最终使整体结构连续性丧失,引发强度参数劣化和宏观的断裂失稳。在这个过程中,厘清微裂纹的扩展问题十分关键,下面对此进行着重阐述。

受外部环境和应力条件的共同约束,岩石中微裂纹的扩展演化行为可被大致划分为以下3类:完全静止、较慢较稳定的亚临界扩展、快速不稳定的动态断裂。当微裂纹处于高温或高反应活性在外加应力水平

显著低于临界应力的条件下,裂纹也会发生极为缓慢的扩展,这一断裂行为称作亚临界扩展^[13]。在物理化学环境下,微裂纹的亚临界扩展速率将被进一步降低或提升,随着时间的推移,逐渐产生了结构强度的强化或劣化。微裂纹的完全静止较为罕见,在真实环境中大都发生着缓慢稳定的亚临界扩展,同时伴随着结构损伤的累积演化。当损伤特征量累积到一定程度时,微裂纹已趋近临界状态,极易发生接近介质声速、快速不稳定的动态断裂行为,同时伴随着裂纹尺度迅速发展及分叉破碎现象,宏观上已表现为整体结构的突然崩解与劈裂。以下示意图1给出了介质内部微裂纹随扩展驱动力增加所表现出的速率演化行为与特征描述(其中动态断裂的图片引自Sharon和Fineberg的杰出工作^[14])。

岩石的断裂破坏基本都可视为这3个过程的时序发展演化,尤其对于泥页岩地层的井壁稳定问题来说,钻井流体与井壁围岩的相互作用机制更多地表现为水化作用和应力作用下微裂纹的亚临界扩展到动态断裂的时序演变。可以说,页岩在化学力学耦合下的水化过程,可视为岩石中微裂纹等缺陷发生更活跃的亚临界扩展行为的综合体现,水化的实质是微细观结构的断裂与软化这一时序损伤过程,最终导致了宏观结构完整性的丧失而产生垮塌失稳。

综上所述,在井壁稳定的研究当中,岩石内部微裂纹在化学力学耦合下的扩展演化行为与亚临界断裂机理值得重点关注,团队基于此提出了“化学断裂”这一力学概念,内容聚焦于物理化学环境中微裂纹扩展的断裂力学理论,以及岩石力学参数对结构损伤演

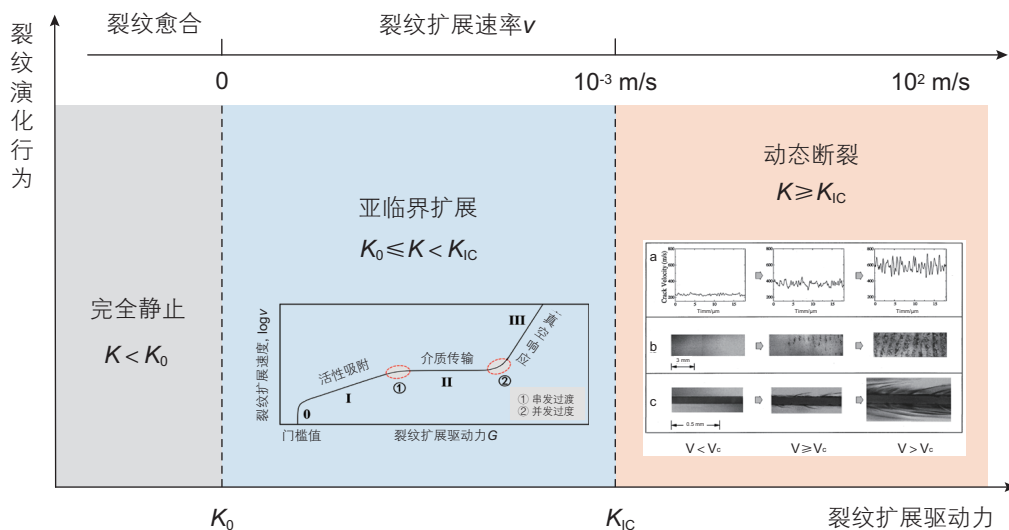


图1 介质内部微裂纹扩展的速率演化行为示意图

Fig. 1 Sketch of velocity evolution behavior of microcrack propagation in a medium

化特征的宏观响应规律。希望在理论和实践的基础上,不断完善化学断裂力学的概念,深化其内涵,从化学断裂力学的视角为解决井壁失稳问题贡献力量。

2 化学力学耦合的微裂纹亚临界断裂机理研究进展

来自英国UCL的B.K. Atkinson教授最早开始系统地研究岩石断裂力学与裂纹的亚临界扩展,在他的相关著作中提到,受外部物理化学环境和应力条件的共同约束,裂纹的亚临界扩展行为十分普遍,包括但不限于地震活动、水力裂缝、火山爆发以及结构的长期稳定性等等,裂纹的亚临界扩展理论可以用来解释和预测许多当时令人费解的现象^[15]。

而在如今,随着油气勘探逐渐迈入深层乃至超深层,尤其是对于水敏性地层的钻井来说,井壁围岩因黏土矿物水化而承担了更多的井壁失稳风险,传统的力学原理需要进一步考虑外部物理化学环境对裂纹扩展演化的影响。团队提出的化学断裂力学理论认为,水化过程也可视为裂纹在化学力学耦合作用下的亚临界扩展,当裂纹扩展到一定程度,即结构损伤累积到临界量时,井壁围岩发生垮塌失稳。因此,从裂纹的亚临界扩展到失稳断裂的演化来解释井壁失稳是可行的,探究环境介质和应力条件下微裂纹的亚临界扩展演化行为十分必要。

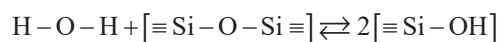
2.1 理论模型

裂纹的亚临界扩展存在多种机制,如应力腐蚀、溶解、扩散、离子交换以及微观塑性等。这些机制能不同程度地解释与时间有关的缓慢断裂现象,通常情况下,多种机制同时存在,但一般只会有一种或几种机制占据主导^[15]。此外,裂纹的亚临界扩展曲线,即K-v图在对数坐标空间中呈现出典型的三区域特征,分别为I区、II区和III区,并具有阈值与区域过渡段。这3个区域的相关描述也存在对应的数学模型,以下对此一并阐述当前的理论进展。

应力腐蚀理论是目前应用最为广泛的模型,由Charles和Hillig^[16]于1962年在一次玻璃断裂的研讨会上首次提出,并由Wiederhorn^[17]、Bolz^[18]、Scholz^[19]、Atkinson^[20]等人不断发展完善并在玻璃、矿物和岩石中开展了实验验证。同时代也有学者对溶解过程、离子交换以及微塑性机制进行了探索,但都局限于某种特定的研究对象,或者是某种特定的环境条件。比如Freiman^[21]关于具有极高溶解度的二元碱-硅酸盐玻璃

在水介质中出现的扩展速率平台的研究,就解释为二氧化硅的溶解效应。还有Wiederhorn^[22]在依赖于水溶液pH值的硅酸盐玻璃和单晶石英矿物的断裂行为研究中,裂纹尖端附近的氢离子与金属阳离子之间的交换反应也可能造成裂纹自发地破裂并伴随亚临界扩展。最后,高温和低应变率条件下的裂纹尖端因不均匀的塑性而成核并发生宏观下的准静态的亚临界扩展,这一过程被解释为微观的塑性流动,来自电子显微镜的证据显示,在方解石中确实存在这一效应^[23]。

应力腐蚀最初源于在水介质环境下硅酸盐玻璃和单晶的石英矿物中裂纹的亚临界扩展加速的解释。该模型最基本的假设是:硅酸盐晶体裂纹尖端处受到应变的Si-O键比未受到应变的键更易对环境介质作出反应,并产生一种弱化键强度的激发态。相应的反应表达式为:



水分子和Si-O键之间的相互作用能成功地解释玻璃和石英矿物当中因应力腐蚀而出现的裂纹亚临界扩展速率显著提高的现象。然而,应力腐蚀只是描述了裂纹尖端附近的键在环境介质中的相互作用,没有考虑到环境中的活性粒子传输到裂尖的过程。因此,应力腐蚀理论只能解释亚临界扩展曲线中的I区行为,即在对数空间中的典型线性特征。

紧接着,关于I区特征的物理过程,主要存在3种假说来描述,一个是基于应力腐蚀的反应速率模型,它描述了一个应力诱导的热激活现象,环境介质中的活性粒子可以通过化学吸附来诱导更加活跃的亚临界扩展^[24],这一模型可以同时考虑外加应力、温度以及环境介质浓度的综合影响,并得到了他们所开展的实验的验证。另外一个用来解释I区陡峭的线性特征的假说,是从Orowan观点继承并发展而来的激活的界面扩散模型,它描述了尾随裂纹尖端附着区的一个界面相互作用,即外来分子的固态扩散^[25]。还有一个假说是本征屏蔽区的内摩擦损耗模型,它是由Maugis^[26]于1985年提出的一个基于连续介质的粘弹性能量耗散机制,在聚合物中得到了可验证的良好应用,速率本构关系是幂函数形式的。

进入亚临界扩展曲线的II区后,扩展速率对外加应力的敏感性大幅降低,在很多实验证据的支持下,这一扩散主导的裂纹扩展过程在速率曲线中表现为一个平滑的水平直线。Lawn^[27]建立了基于稀薄气体的自由分子流动的速率模型,认为活性的气体分子需要一定的时间传输到裂纹尖端附近,当输运时间大于裂尖的反应时间时,裂纹扩展速率由输运过程主导。他考

虑了 Knudsen 气体在裂纹界面间的自由流动,并随时可能与裂纹壁面发生碰撞而引起压力的衰减,并提出了一种处理 I 区和 II 区之间的过渡区域扩展速率的可能描述。据 Karunaratne 和 Lewis^[28]的研究,裂纹在高温下的亚临界扩展行为更多地由质量传输所主导,扩散速率的本构关系可以用幂函数形式的经验公式所描述,这一特征与应力腐蚀机制主导的 Charles 幂律方程^[29]十分相似。可是,这两者都采取了经验公式拟合的数学描述,内部的微观机制尚未能充分得到解释,并且 I 区和 II 区之间的串发协同的过渡区域大小也难以度量。

关于裂纹亚临界扩展速率曲线的 III 区,由于速率已接近介质声速,因而可视为动态断裂力学范畴,相应的论述可参见 Freund 等人^[30]的著作。

到目前,关于裂纹亚临界扩展机制与模型的理论研究进展不大,大都采取了 Charles 应力腐蚀理论的幂律经验公式,并以门槛值、亚临界扩展指数以及其他拟合参数来评价扩展速率在不同环境下的变化特征。这对于复杂的岩石来说有些过于简化,但也不失为一种方便的工程描述手段,希望在岩石中能更多考虑矿物组分、胶结情况和孔隙压力分布下的亚临界断裂特征,尤其是对于富含黏土的水敏性页岩,水化膨胀分散行为对亚临界扩展的重要影响。

3.2 试验测试

在研究裂纹的扩展行为与材料的断裂机理过程中,断裂力学体系涌现了很多方法,如三点弯曲、单边缺口拉伸、双悬臂梁以及双扭测试等等。由于岩石属于不透明介质,不易追踪裂纹的亚临界扩展轨迹,而双扭法则克服了这些局限,并且还能揭示外部环境对断裂行为的影响规律,在探究微裂纹的亚临界扩展行为与断裂机理中具有显著优势^[31-32]。

双扭测试方法最先由 Outwater 于 1966 年提出^[33],后续在 Evans 和 Williams 的合作下进一步发展完善^[34-35],准确推导出了裂纹尖端的应力强度因子与裂纹扩展速率表达式。在此基础上,又建立了常载荷^[36]、常位移速率^[37]以及常位移松弛^[35-37]这 3 种不同的加载模式。其中常位移松弛法因其操作简便,无需追踪裂纹实时长度的优势得到了广泛应用。

起初,双扭测试方法被用于研究玻璃、陶瓷等典型脆性材料的断裂力学性质,而后由 Atkinson^[20]于 1979 年率先推广到岩石等准脆性介质的断裂韧性测定以及亚临界扩展行为的研究中,他当时采用的是砂岩、大理岩以及辉长岩,得到了很多有益的探索结果。而后又探究了外部化学环境对细粒石英矿物的亚临界扩

展行为以及应力腐蚀过程的影响规律^[38]。同时期还有 Henry^[39]和 Swanson^[40]等学者对岩石和矿物中裂纹亚临界扩展行为的研究。

自此之后的四十多年中,国内外学者对不同岩石类型以及不同环境条件下的微裂纹亚临界扩展演化行为进行了大量研究与工作,对化学力学耦合下的岩石中微裂纹的亚临界扩展行为进行了详细阐述,初步揭示了微裂纹的断裂演化对外部物理化学环境的响应规律。由于这方面的研究工作不胜枚举,以下仅按时间线综述一些典型的研究进展。

1980 年, Waza^[41]用双扭法研究了水对安山岩和玄武岩岩石中裂纹亚临界扩展速率的影响,结果表明在水饱和的岩石中,裂纹的亚临界扩展速率比室温下干燥的岩石大 2~3 个数量级,并指出应力腐蚀可能是主导这类多晶硅酸盐岩石膨胀和蠕变等行为的重要机制。

1987 年, Lajtai^[42-43]采用双扭法探究了不同环境湿度条件下,花岗岩分别受拉伸和压缩时裂纹的亚临界扩展特征,建立了裂纹扩展速率与应力强度因子的经验拟合公式,结果表明环境湿度会进一步提高花岗岩内部微裂纹的亚临界扩展速率,并显著降低岩石强度和寿命。

1992 年, 罗礼等人^[44]结合常位移松弛法和双扭测试技术,对粗、细粒大理岩、闪长岩、侵入岩和石英岩等 5 类岩石中裂纹的亚临界扩展行为进行了细致探究,结果表明,裂纹的亚临界扩展速率与应力强度因子关系在 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平上能同时符合 Charles 方程以及 Hillig 和 Charles 方程描述,并且水分能显著提高裂纹的亚临界扩展速率,不同岩石类型之间还有差异,同时指出数据离散性大的原因可能是由于岩石本身矿物成分、颗粒大小以及力学特征的不均质而引起的,并建议应做多次试验取平均值处理。

1994 年, Dunning 等人^[45]基于双悬臂梁拉伸试验研究了化学环境下单晶石英和方解石矿物中裂纹的亚临界扩展演化特征,结果表明 pH 值和离子浓度对亚临界扩展速率影响较大且由应力腐蚀机制主导,并给出了门槛值的极限估计。进一步的分析指出,外部化学环境通过增强裂纹的亚临界扩展,促进结构的损伤累积并最终导致大尺度的地质灾害。

1999 年, 肖洪天等^[46]以三峡船闸花岗岩样品为研究对象,利用自行研制的加载装置,基于常位移松弛法测试了裂纹的亚临界扩展速率,并得到了稳定的断裂韧性实验值。通过对比分析载荷及应变的松弛特征,验证了自研装置的合理性与试验结果的可靠性。

2005 年, Nara 等人^[47]采用双扭技术和常位移松弛

法探究了不同水蒸气压力下安山岩中裂纹的亚临界扩展规律,结果表明,较高的水蒸气压会促进裂纹的扩展。此外,还探讨了试验结果对双扭试件不同导向槽形状的敏感性,发现矩形槽最适合双扭测试,可重复性水平最高。同时,进一步量化了应力腐蚀机制下亚临界扩展的活化能,指出在不同温度、湿度和应力条件下裂纹亚临界扩展速率在理论上的可预测性。

2008年,蒋青青等人^[48]基于双扭常位移松弛法探究了花岗岩分别在空气条件和饱和水环境下裂纹的亚临界扩展行为与断裂特征,结果表明,在双对数坐标空间中,饱和水样品的K-v曲线比空气条件下的截距更高、斜率更小,即水能加速裂纹的亚临界扩展。

此外,关于水对岩石中裂纹亚临界扩展的影响规律,众多学者^[49-51]都进行了相似的研究,并得到了一致的结论,即水能显著提高裂纹的亚临界扩展速率,导致结构更容易地损伤。

2010年,Nara等人^[52]利用双扭技术探究了相对湿度和温度对安山岩、花岗岩裂纹亚临界扩展的影响规律,结果表明,相同条件下,裂纹的亚临界扩展速率随着环境温度的升高而增加,随着相对湿度的提升而急剧增加。进一步的分析指出,相对湿度增加3~4倍会引起亚临界扩展速率增加1~4个数量级,这比经典的应力腐蚀理论预测的要大很多,推测是源于靠近裂纹尖端处的水蒸气冷凝而引发的额外毛细管压力。2011年,他们又采用相似的方法对不同相对湿度和温度下3类砂岩的裂纹亚临界扩展速率^[53]进行了探究,结果表明,相同条件下温度的上升并不能使裂纹的亚临界扩展速率增加很明显,而相对湿度的增加却能显著提高裂纹扩展速率,并且比应力腐蚀理论所预测的要大很多,猜测可能是由于砂岩中黏土矿物的膨胀而引起的。这一点为以后关于富黏土页岩的亚临界断裂机制提供了有益探索。

2012年,Rostom^[54]利用双扭试验对不同流体组分及浓度条件下方解石中裂纹的亚临界扩展进行了相关探究,研究发现,流体成分会显著影响矿物中裂纹的亚临界扩展速率和界面能,矿物界面能在低的NaCl溶液浓度下有所提高,而抑制裂纹的亚临界扩展。不同流体的活性离子会对裂纹扩展产生不尽相同的促进效果,这中间存在一个阈值。同时,Rostom认为化学溶液对岩石的亚临界扩展的影响源于裂纹尖端界面间的静电相互作用。

2016年,Bergsaker等人^[55]同样对单晶方解石矿物中裂纹的亚临界扩展行为进行了细致研究,选取的敏感因素是pH值、离子类型及浓度。结果表明,在碳

酸钙饱和溶液环境下,pH值在5~7.5范围内几乎对裂纹的亚临界扩展和矿物的界面能不产生影响,这一结论有望对二氧化碳的地质封存和长期稳定性提供有益的参考。此外,研究还发现低浓度的钠离子溶液会降低裂纹的亚临界扩展速率,而高浓度则会增加,镁离子对裂纹的扩展无明显影响。

关于外部化学环境中的流体类型及浓度对不同岩石或矿物类型中裂纹亚临界扩展的影响规律,还有其他学者也采用了相似方法进行了大量研究,此处不再一一赘述。

此前,几乎没有专门针对页岩中裂纹亚临界扩展的探索,直到2017年来自UT Austin的Chen等人^[56]的工作。他们选取了美国中南部Oklahoma州的Woodford页岩样品,并采取油基切割的方式来保证其中的20%黏土矿物(主要为伊利石)不会发生散裂,成功加工出了双扭测试所需的岩样。探究了该页岩在常温的室内空气、干二氧化碳和去离子水条件下裂纹的亚临界断裂演化特征,包括用以描述Charles理论的拟合常数以及宏观的断裂韧性。结果表明,与室内环境相比,水的存在会劣化岩石参数,水岩相互作用导致了断裂韧性的降低和塑性效应的增强。此外,通过涂抹疏水剂将水岩作用限制在裂纹尖端附近,能降低亚临界指数并提高扩展速率。进一步的分析表明,水与黏土之间的相互作用可能导致K-v曲线与经典幂律描述之间的偏差,并呈现出随时间相关的逐渐劣化,而这一过程主要源于黏土的水化分散。

2019年,Chen等人^[57]又继续采用双扭试验探究了不同环境介质对3种页岩(Woodford; Mancos; Marcellus)断裂参数的影响规律,结果表明,对于富含黏土的2种页岩,水含量的增加会由于发生结晶膨胀而导致断裂韧性和亚临界指数下降,而干燥二氧化碳对断裂行为影响很小,即使对不富含黏土的Marcellus页岩也是如此。涂抹疏水层而不进行预浸泡与其他环境的对比结果显示,富黏土页岩的亚临界扩展曲线介于室内空气和全部浸水环境的扩展曲线之间并偏离了经典的幂律描述,说明充分地水岩作用后会显著提高裂纹的亚临界扩展速率,而物理化学的水岩作用和机械的裂纹扩展同时存在会产生相互竞争,并呈现出与时间相关的渐进演化过程。此外,微观结构和矿物学分析显示,富黏土页岩的亚临界断裂机制表现为沿晶断裂,通过水强化的亚临界扩展行为,可以显著增强富黏土页岩的脆性破坏特征。

2020年,Chen等人^[58]在以往成果的基础上,进一步探究了离子浓度、pH值和温度对前述3种页岩断

裂力学参数的控制及其在化学反应性流体环境中对裂纹亚临界扩展的影响规律。结果表明,富黏土页岩的断裂韧性和亚临界裂纹扩展速率对离子浓度敏感,而对溶液pH值不敏感;钠离子浓度的增加会提高断裂韧性和亚临界指数,对页岩裂纹的亚临界扩展产生了抑制效果;温度的升高能有效促进3类页岩中裂纹的亚临界扩展,表现为速率曲线在K-v图中向左移动,同时伴随着扩展速率对离子浓度敏感性的降低。此外,进一步的分析显示,即使对于低膨胀性的由伊利石主导的页岩,黏土的水化特性也将显著提高裂纹的亚临界扩展速率,对于外部物理化学环境影响下的变形与断裂,以及随时间的演化进程中十分重要。总之,流体既能强化岩石,也能劣化岩石,这取决于岩性和化学环境所诱导的作用机制。

2022年,Yan等人^[59]探究了水饱和条件下富黏土页岩和致密砂岩中裂纹的亚临界扩展演化行为。他们选取的是来自于鄂尔多斯盆地的致密砂岩和来自于四川盆地龙马溪组的页岩,环境介质分别为室内空气、去离子水以及滑溜水,试验方法依然是双扭测试结合常位移松弛法。结果表明,相同条件下,去离子水环境中的裂纹亚临界扩展速率最高,室内空气环境中的最低,滑溜水环境的则介于两者之间,水的存在会显著加速裂纹的扩展。进一步的结果显示,去离子水条件下,黏土与水的相互作用是加速裂纹亚临界断裂的主要原因。此外,水溶液降低了裂纹界面的摩擦系数,能够增加裂纹扩展的复杂程度,而页岩由于其高蒙脱石含量,产生的裂纹的复杂程度比砂岩要高。

2022年,来自中南大学的Li^[60]等人选取了来自国内不同地区的玄武岩、大理岩、花岗岩、红砂岩和白砂岩这5种岩性,利用3D-DIC技术成功观测到了他们的裂纹扩展过程和断裂特征演化,并采用双扭试验测试了它们的断裂韧性和亚临界扩展曲线。虽然其中缺乏页岩,但是继承Nara的观点,侧重探究了潜在的亚临界断裂行为对岩土工程的长期稳定性的影响评估。结果表明,在岩石临界失稳之前,介于0.73~0.83倍断裂韧性的应力强度因子加持下,5种岩石都发生了亚临界断裂,相同条件下,花岗岩和玄武岩的亚临界扩展速率较快。此外,短期内玄武岩的长期强度最高,而超过408年的长期后,花岗岩最高。这些结果为从裂纹的亚临界断裂行为探究岩土工程的长期稳定性提供了积极的探索和有益的参考借鉴。

2023年,Li^[61]的团队继续以石英闪长岩、白砂岩和红砂岩为研究对象,着重探究了这3种不同石英含量的岩石在双扭测试试验中所表现出的亚临界断裂行

为特征。与以往的浸泡处理方法不同,创新地通过医用针头将水引入导向槽而保证水能充分到达裂纹尖端附近,以对比去离子水环境和空气环境的差异。结果表明,裂纹的亚临界扩展对水的反应非常剧烈,与空气环境相比,水的存在能不同程度地降低Charles幂律拟合下的亚临界指数,并且提高裂纹扩展速率近1个数量级。通过合理地控制水流开关来将水引入导向槽,能方便对比有无水条件下亚临界断裂行为的差异。详细的实验观察发现,在水环境下,当水到达裂纹尖端附近区域时,载荷松弛曲线发生了骤然上升的突变,3D-DIC技术提取的底部监测点处应变即刻增加,反映到亚临界扩展曲线上则表现为随着应力强度因子的降低,裂纹扩展速率反而提高,他们认为是水突然地到达尖端附近并不会立刻使岩石颗粒膨胀或饱和,从而观测到的反应如此剧烈。笔者认为,与以往浸泡处理后的岩石性质劣化已经趋近于稳定不同,控制水流到达裂纹尖端能敏锐地被实验捕捉并记录下来,尖端附近的应力腐蚀反应十分迅速,瞬间的水合力提高了应力强度因子,加快了裂纹亚临界扩展速率。

同年,Li^[62]的团队继承2022年的工作,又深入探究了这5种不同类型的岩石所表现出的亚临界扩展和动态断裂行为之间的差异。同时结合DIC技术研究了双扭测试中岩样断裂过程区的尺寸,发现其大致在21 mm到34 mm之间。进一步的分析结果表明,亚临界断裂后的裂纹表面形态比动态断裂更为粗糙,两者均与最大晶粒尺寸呈正相关。扫描电镜图像显示出,亚临界扩展的裂纹优先沿晶界扩展,属于沿晶断裂,而动态断裂的裂纹则优先穿过晶体颗粒扩展,并伴有部分晶间裂纹,属于穿晶断裂。

综上所述,目前对于岩石中裂纹亚临界断裂演化行为的试验测试,已经覆盖了绝大多数的岩性,并延展到了外部环境中不同的介质类型及浓度、相对湿度、pH值和温度等条件,众多影响因素基本上都得到了敏感性分析和作用规律评价。尤其是水环境下的裂纹扩展加速已取得了一致认知,以及富黏土页岩在水作用下的亚临界断裂行为也已在近年来开始被成功地研究,并获得了一些重要结果。然而,当前对于岩石裂纹的亚临界扩展研究大都聚焦于双扭试验测试,只关注了单一裂纹的演化情况,并且没有考虑外部附加的地应力和孔隙压力条件,也尚未见到在钻井液这种流体环境下的亚临界断裂实验和机理研究相关的报道。此外,单纯的经验公式描述难以有效揭示全部的断裂机理,拟合参数的量级波动较大,对于混矿集合体的不同种类岩石无法提供准确的参考与相互之间的对比。

4 当前研究中的几个具体问题与思考

通过对化学力学耦合的岩石微裂纹亚临界断裂机理研究现状的综合分析,可以总结出当前的研究工作中存在以下几个问题:

(1)作为诱发岩石损伤演化和强度劣化的关键因素,从理论模型上探究化学力学环境中微裂纹的亚临界扩展,大多基于Si-O键与水的应力腐蚀这一热激活过程的作用机制,然而对于裂纹尖端附近区域的溶解、沉淀、吸附、扩散、离子交换以及微塑性等其他作用机制在岩石中缺乏量化描述,且他们之间的共存与竞争机制也鲜有相关研究与报道;

(2)岩石是一种天然的由混合矿物相互排列、胶结而成的复杂结构体,微裂纹尖端界面附近分布着多种多样的矿物颗粒与胶结组分,在这一复杂结构下微裂纹的亚临界扩展行为是否还能用传统的模型机制解释有待考究,尤其是近年来关于富黏土页岩中裂纹的亚临界扩展特征所表现出的与经典Charles幂律显著偏离的事实,进一步证实了水化机制的重要性。然而水化与其他作用机制到底谁占主导,以及水化与应力腐蚀等相互之间的竞争尚不明确;

(3)从试验方法探究不同种类岩石中裂纹的亚临界扩展主要集中于常位移松弛法配置下的双扭测试技术。虽然能将温度、相对湿度、pH值、不同流体类型及浓度等诸多外部物理化学环境的影响因素考虑在内,但缺乏相关公式的定量描述,目前大都局限于定性认识,并且,尚未见到在钻井液这种流体环境下亚临界断裂实验和机理相关的报道;

(4)双扭法只关注了单一裂纹在不同环境下的演化行为,而实际岩石中的微裂纹数量众多且具有不同的取向与分布,并承受着原位地应力和孔隙压力的载荷条件,这些实际因素目前都难以结合到实验测试中。此外,微裂纹亚临界扩展曲线,即K-v图所描述的本构关系绝大多数都采用了Charles等学者的幂律拟合或指数拟合,这些半经验的关系式难以有效、充分揭示不同化学力学环境下微裂纹的亚临界扩展演化行为与

断裂机理。

基于以上分析,期望从化学断裂的全新角度探究微裂纹在化学力学耦合作用下的扩展演化特征,建立化学断裂力学模型,基于多裂纹的亚临界扩展构建损伤变量表达式,探究不同化学力学环境对微裂纹亚临界扩展和损伤跨尺度演化的影响规律,为研究深层硬脆性泥页岩井壁稳定问题提供崭新思路与方法。其中,拟需要关注和解决的关键问题如下:

(1)探索流体化学环境对页岩黏土矿物水化膨胀、分散的作用机制,建立从微观的晶层水化到微裂纹萌生和扩展的化学断裂力学模型,并揭示微裂纹扩展演化对不同流体组分及浓度的响应规律。这一过程解释了页岩水化过程中新的微裂纹是如何形成的。

(2)从微裂纹的亚临界扩展理解结构损伤的积累与演化,揭示微裂纹在化学力学耦合作用下的亚临界扩展行为与特征,推导并建立多裂纹亚临界扩展诱导的损伤变量表达式。这一过程描述了微裂纹是如何在化学力学环境下发生亚临界扩展的,裂纹扩展速率形式又是什么样的,以及微裂纹的亚临界扩展是怎样诱导结构损伤演化的。

(3)以微裂纹的亚临界扩展诱导损伤积累来进一步描述岩石力学参数的劣化,推导损伤变量的时序演化方程,开展钻井液与页岩相互作用的断裂特征实验,探究损伤的跨尺度演化特征对岩石强度劣化的影响规律,建立岩石由微裂纹亚临界扩展主导的损伤积累到临界突变失稳的化学断裂力学判据。这一过程阐明了微裂纹扩展诱导的损伤演化是如何影响岩石力学参数和井壁稳定性的,以及是怎样诱发井壁围岩临界失稳垮塌的,即微裂纹亚临界扩展到什么程度才会导致动态断裂,自此之后的时序演化特征又进一步诠释了坍塌周期概念。

(4)在前面的基础上,建立基于化学断裂力学的井壁稳定新模型,提出控制微裂纹扩展的防塌钻井液抑制性定量评价新方法,形成基于水化抑制性和微裂纹封堵性的保障井壁稳定的新对策,为深层页岩安全高效钻井提供科学依据和理论借鉴。

参考文献

- [1] 陈勉,金衍.深井井壁稳定技术研究进展与发展趋势[J].石油钻探技术,2005,33(5):28-34.[CHEN M, JIN Y. Advances and developmental trend of the wall stability technique[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 28-34.]
- [2] 曾义金,刘建立.深井超深井钻井技术现状和发展趋势[J].石油钻探技术,2005,33(5):1-5.[ZENG Y J, LIU J L. Technical status and developmental trend of drilling techniques in deep and ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 1-5.]

- [3] 黄荣樽, 陈勉, 邓金根, 等. 泥页岩井壁稳定力学与化学的耦合研究[J]. 钻井液与完井液, 1995(03): 18–24+28. [HUANG R Z, CHEN M, DENG J G, et al. Coupling mechanics and chemistry of mud shale well wall stabilization[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 1995(03): 18–24+28.]
- [4] 徐同台. 井壁稳定技术研究现状及发展方向[J]. 钻井液与完井液, 1997, 14(4): 36–43. [XU T T. Research status and development direction of wellbore stability technology[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 1997, 14(4): 36–43.]
- [5] 邓虎, 孟英峰. 泥页岩稳定性的化学与力学耦合研究综述[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 109–111. [DENG H, MENG Y F. Review on chemical and mechanical coupling of shale stability[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(1): 109–111.]
- [6] 金衍, 薄克浩, 张亚洲, 等. 深层硬脆性泥页岩井壁稳定力学化学耦合研究进展与思考[J/OL]. 石油钻探技术, 2023, 51(04): 159–169. [JIN Y, BO K H, ZHANG Y Z, et al. Research progress on chemo-mechanical coupling wellbore stability in deep hard brittle shale[J/OL]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(04): 159–169.]
- [7] 王建华, 鄢捷年, 苏山林. 硬脆性泥页岩井壁稳定评价新方法[J]. 石油钻采工艺, 2006(02): 28–30+83. [WANG J H, YAN J N, SU S L. A new method for evaluating well wall stability in hard and brittle mud shales[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2006(02): 28–30+83.]
- [8] CHENEVERT M E. Shale alteration by water adsorption[J]. *Journal of petroleum technology*, 1970, 22(09): 1141–1148.
- [9] 石秉忠, 夏柏如, 林永学, 等. 硬脆性泥页岩水化裂缝发展的CT成像与机理[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 137–142. [SHI B Z, XIA B R, LIN Y X, et al. CT imaging and mechanism of hydration fracture development in hard brittle shale[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 137–142.]
- [10] ANDERSON T L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*[M]. CRC press, 2017.
- [11] HOLDER J, OLSON J E, PHILIP Z. Experimental determination of subcritical crack growth parameters in sedimentary rock[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(4), 599–602.
- [12] NARA Y, MORIMOTO K, YONEDA T, et al. Effects of humidity and temperature on subcritical crack growth in sandstone[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48.7–8: 1130–1140.
- [13] ATKINSON B K. Subcritical crack-propagation in rocks—Theory: Experimental results and applications[J]. *Journal of Structural Geology*, 1982, 4(1): 41–56.
- [14] SHARON E, FINEBERG J. Microbranching instability and the dynamic fracture of brittle materials[J]. *Physical Review B*, 1996, 54(10): 7128.
- [15] ATKINSON B K, MEREDITH P G. The theory of subcritical crack growth with applications to minerals and rocks[M]. London: Academic. In *Fracture mechanics of rock*, 1987: 111–166.
- [16] CHARLES R J, HILLIG W B. In *Symposium sur la Resistance du Verreet les Moyens de l' Ameliorer*[C]//Union Scientifique Continentale du Verre. Charleroi, Belgium, 1962: 511–527.
- [17] WIEDERHORN S M. Influence of water vapor on crack propagation in soda - lime glass[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1967, 50(8): 407–414.
- [18] WIEDERHORN S M., BOLZ L H. Stress corrosion and static fatigue of glass[J]. *Journal of the American ceramic society*, 1970, 53(10): 543–548.
- [19] DAS S, SCHOLZ C H. Theory of time-dependent rupture in the earth[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, 86: 6039–6051.
- [20] ATKINSON B K. Fracture toughness of Tennessee sandstone and Carrara marble using the double torsion testing method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1979, 16: 46–53.
- [21] FREIMAN S W. Effects of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89: 4072–4076.
- [22] WIEDERHORN S M, FULLER E R, THOMSON, R. Micromechanisms of crack growth in ceramics and glasses in corrosive environments[J]. *Meat Science*, 1980, 14: 450–458.
- [23] MEREDITH P G, ATKINSON B K. Fracture toughness and subcritical crack growth during high-temperature tensile deformation of Westerlygranite and Black gabbro[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1985, 39: 33–51.
- [24] POLLET J C, BURNS S J. Thermally activated crack propagation—theory[J]. *International Journal of Fracture*, 1977, 13(5): 667–679.
- [25] LAWN B R, WILSHAW T R. *Fracture of brittle solids*[M]. Cambridge University Pre, 1975.
- [26] MAUGIS D. Subcritical crack growth, surface energy, fracture toughness, stick-slip and embrittlement[J]. *Journal of materials Science*, 1985, 20: 3041–3073.
- [27] LAWN B R. Diffusion-controlled subcritical crack growth in the presence of a dilute gas environment[J]. *Materials Science and Engineering*, 1974, 13(3): 277–283.
- [28] KARUNARATNE B S, LEWIS, M. H. High-temperature fracture and diffusional deformation mechanisms in Si-Al-ON ceramics[J]. *Journal of Materials Science*, 1980, 15: 449–462.

- [29] CHARLES R J. Static fatigue of glass. II[J]. *Journal of applied physics*, 1958, 29(11): 1554–1560.
- [30] FREUND L B. *Dynamic fracture mechanics*[M]. Cambridge university press, 1998.
- [31] KO T Y, KEMENY J. Determination of the subcritical crack growth parameters in rocks using the constant stress-rate test[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 59(5): 166–178.
- [32] 王学成, 金志浩, 李光新, 等. 双扭法及其在脆性材料力学性能评定中的应用[J]. *材料科学进展*, 1989(05): 436–441. [WANG X C, JIN Z H, LI G X, et al. Double torsion method and its application to the evaluation of mechanical properties of brittle materials[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 1989(05): 436–441.]
- [33] OUTWATER J O, GERRY D J. On the fracture energy of glass[J]. USNL report Contract NONR, 1966, 3219(01).
- [34] EVANS A G. A simple method for evaluating slow crack growth in brittle materials[J]. *International Journal of Fracture*, 1973, 9: 267–275.
- [35] WILLIAMS D, EVANS A. A simple method for studying slow crack growth[J]. *Journal of testing and evaluation*, 1973, 1(4): 264–270.
- [36] KIES J A. Fracture propagation rates and times to fail following proof stress in bulk glass[J]. *Fracture* 1969: 483–491.
- [37] EVANS A G. A method for evaluating the time-dependent failure characteristics of brittle materials-and its application to polycrystalline alumina[J]. *Journal of Materials Science*, 1972, 7(10): 1137–1146.
- [38] ATKINSON B K. Stress corrosion and the rate-dependent tensile failure of a fine-grained quartz rock[J]. *Tectonophysics*, 1980, 65(3–4): 281–290.
- [39] HENRY J P. Experimental study of crack propagation in calcite rocks[C]//*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, 1977, 14(2): 85–91.
- [40] SWANSON P L. Subcritical crack growth and other time - and environment - dependent behavior in crustal rocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B6): 4137–4152.
- [41] WAZA T, KURITA K, MIZUTANI H. The effect of water on the subcritical crack growth in silicate rocks[J]. *Tectonophysics*, 1980, 67(1–2): 25–34.
- [42] LAJTAI E Z, SCHMIDTKE R H, BIELUS L P. The effect of water on the time-dependent deformation and fracture of a granite[C]//*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, 1987, 24(4): 247–255.
- [43] LAJTAI E Z, BIELUS L P. Stress corrosion cracking of Lac du Bonnet granite in tension and compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1986, 19: 71–87.
- [44] 罗礼, 孙宗顺. 双扭法研究岩石亚临界裂纹扩展速度和断裂韧度[J]. *岩土工程学报*, 1992(03): 40–48. [LUO L, SUN Z Q. Study of subcritical crack extension rate and fracture toughness in rocks by double-twisting method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1992(03): 40–48.]
- [45] DUNNING J, DOUGLAS P, MILLER M, et al. The role of the chemical environment in frictional deformation: Stress corrosion cracking and comminution[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1994, 143(1–3): 151–178.
- [46] 肖洪天, 杨若琼, 周维垣. 三峡船闸花岗岩亚临界裂纹扩展试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999(04): 79–82. [XIAO H T, YANG R Q, ZHOU W Y. Experimental study on subcritical crack expansion of granite in Three Gorges locks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999(04): 79–82.]
- [47] NARA Y, KANEKO K. Study of subcritical crack growth in andesite using the Double Torsion test[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005, 42(2): 521–530.
- [48] 蒋青青, 李江腾, 胡毅夫, 等. 水对亚临界裂纹扩展的影响[J]. *岩土力学*, 2008(09): 2527–2530. [JIANG Q Q, LI J T, HU Y F, et al. Effect of water on subcritical crack propagation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008(09): 2527–2530.]
- [49] 曹平, 杨慧, 江学良, 等. 水岩作用下岩石亚临界裂纹的扩展规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(02): 649–654. [CAO P, YANG H, JIANG X L, et al. Expansion law of subcritical cracks in rocks under water-rock action[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2010, 41(02): 649–654.]
- [50] 万琳辉, 曹平, 黄永恒, 等. 水对岩石亚临界裂纹扩展及门槛值的影响研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(09): 2737–2742. [WAN B H, CAO P, HUANG Y H, et al. A study of the effect of water on subcritical crack extension and threshold of rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(09): 2737–2742.]
- [51] 杨斌. 水相自吸诱发页岩裂缝起裂扩展行为研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018. [YANG B. Study on the fracture initiation and expansion behavior of shale cracks induced by aqueous-phase self-absorption[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.]
- [52] NARA Y, HIROYOSHI N, YONEDA T, et al. Effects of relative humidity and temperature on subcritical crack growth in igneous rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(4): 640–646.
- [53] NARA Y, MORIMOTO K, YONEDA T, et al. Effects of humidity and temperature on subcritical crack growth in sandstone[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(7–8): 1130–1140.
- [54] ROSTOM F, ROYNE A, DYSTHE D, et al. Effect of fluid salinity on subcritical crack propagation in calcite[J]. *Tectonophysics*, 2013, 583: 68–75.

- [55] BERGSAKER A S. The effect of fluid composition, salinity and acidity on subcritical crack growth in calcite crystals[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(3): 1631–1651.
- [56] CHEN X, EICHHUBL P, OLSON J E. Effect of water on critical and subcritical fracture properties of Woodford shale[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(4): 2736–2750.
- [57] CHEN X, EICHHUBL P, OLSON J. E, et al. Effect of water on fracture mechanical properties of shales[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(3): 2428–2444.
- [58] CHEN X, EICHHUBL P, OLSON J E, et al. Salinity, pH, and temperature controls on fracture mechanical properties of three shales and their implications for fracture growth in chemically reactive fluid environments[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2020, 21: 100140.
- [59] YAN W, HUANG X, MUCHIRI N D, et al. Subcritical crack growth behavior of clay - rich unconventional tight rocks under water - saturated conditions[J]. *Energy Science & Engineering*, 2023, 11(2): 826–837.
- [60] MA J, LI D, LI P, et al. Subcritical crack growth and fracture behavior of rocks and long-term strength estimation[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 122: 103664.
- [61] MA J, LI D, GONG H, et al. Subcritical crack growth and fracture behavior of three rocks containing quartz under wet and dry conditions[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023: 103948.
- [62] MA J, LI D, DU S, et al. Comparison of subcritical crack growth and dynamic fracture propagation in rocks under double-torsion tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 170: 105481.

(编辑 杨雅露)