

变载荷压裂特征研究进展及展望

孙伟¹, 张广清^{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, zhangguangqing@cup.edu.cn

收稿日期: 2024-11-22; 修回日期: 2025-02-10

国家杰出青年科学基金(51925405) 和国家自然科学基金重点项目(52434001) 联合资助

摘要 水力压裂是非常规能源开采的重要手段。然而, 传统水力压裂面临诸多挑战, 如过高的破裂压力、潜在的断层滑移风险以及酸化压裂液对环境的污染等。如何在降低诱发自然灾害风险的前提下, 实现高效的储层改造是关键科学问题, 这迫切需要探索新的压裂方式以应对这些挑战。近年来, 变载荷压裂作为一种通过物理或化学手段引起作用于地层岩石上的载荷(如压力、流体、温度以及高能气体等)周期性或随机变化的压裂施工形式, 逐渐引起人们的广泛关注。变载荷压裂强调压裂过程中, 流体、温度、高能气体等因素与岩石这种多孔介质之间的多场耦合作用, 这区别于金属的机械疲劳破坏, 其概念范围更加广泛。本文系统梳理了变载荷压裂实验的最新进展, 从研究对象、影响因素、研究内容及分析方法进行了全面总结。将变载荷压裂作用形式划分为 6 种: 循环载荷、递增载荷、阶梯载荷、脉冲载荷、冲击载荷和组合载荷。重点关注变载荷对岩石破裂前后的具体影响, 并归纳总结了 4 个变载荷压裂特征: 降低岩石破裂压力、降低岩石破裂能量、改变岩石渗透率以及产生复杂裂缝形态。进一步从岩石疲劳断裂、应力腐蚀、爆燃压裂裂缝扩展等方面探讨了变载荷压裂相关作用机制。最后, 着重对变载荷压裂特征研究做了未来展望, 认为要明确岩石结构特征对增渗效果及复杂裂缝形态的影响。紧跟深层/超深层开发研究趋势, 考虑复杂极端条件下变载荷压裂适用性和新变化, 以拓宽变载荷压裂研究发展空间。从多场、多尺度、多时度的角度综合分析变载荷压裂作用特征及内在机理。本文旨在为变载荷压裂提供基础性认知, 并为未来研究发展提供思路 and 方向。

关键词 变载荷压裂; 破裂压力; 破裂能量; 渗透率; 裂缝形态

中图分类号: TE357; TU45

Progress and prospects of variable load fracturing characteristics

SUN Wei¹, ZHANG Guangqing^{1,2}

1 School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

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

Received: 2024-11-22; Revised: 2025-02-10

Abstract Hydraulic fracturing plays a crucial role in the development of unconventional energy resources. However, traditional hydraulic fracturing faces many challenges, such as excessive breakdown pressure, potential geological risk of fault slip, and pol-

引用格式: 孙伟, 张广清. 变载荷压裂特征研究进展及展望. 石油科学通报, 2025, 10(01): 87-106

SUN Wei, ZHANG Guangqing. Progress and prospects of variable load fracturing characteristics. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(01): 87-106. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.02.004

lution of the environment by acid fracturing fluids, etc. How to achieve efficient reservoir reformation on the premise of reducing the risk of inducing natural disasters is a key scientific topic, and the new fracturing methods were needed urgently to deal with these challenges. Recently, variable-load fracturing, as a form of fracturing operation that applies periodic or random variable loads (such as pressure, fluid, temperature, and high-energy gas, etc.) acting on formation rocks through physical or chemical means, has gradually attracted widespread attention. Variable-load fracturing emphasizes the multi-field coupling effect between factors such as fluid, temperature, high-energy gas, etc. and the porous medium of rocks during the fracturing process, which is fundamentally different from the mechanical fatigue failure of metals and has a broader conceptual scope. This paper systematically reviews the latest advancements in variable-load fracturing experiments and comprehensively summarizes the findings from four key perspectives: research subjects, influencing factors, research contents, and analytical methods. The variable-load actions are categorized into six primary types: cyclic load, increasing load, stepped load, pulse load, impact load, and combined load. Particular attention is given to the specific effects of variable-load on rocks both before and after fracture, summarizing four characteristics of variable-load fracturing: reduction in rock fracture pressure, decrease in rock fracture energy, alteration in rock permeability, and generation of complex fracture patterns. Furthermore, this paper delves into the underlying mechanisms of variable-load fracturing, examining aspects such as rock fatigue fracture, stress corrosion, and fracture propagation in deflagration fracturing. Finally, the future research directions on variable-load fracturing characteristics were emphasized. It is believed that the influence of rock structure characteristics on the permeability enhancement effect and complex fracture morphology should be clarified. Keeping up with the research trends in deep/ultra-deep reservoir development, the applicability and potential changes of variable-load fracturing under complex and extreme conditions should be considered thoroughly to broaden the research and development space for variable-load fracturing. The action characteristics and internal mechanisms of variable-load fracturing should be comprehensively analyzed from the perspectives of multiple fields, multiple scales, and multiple time periods. This paper aims to provide a comprehensive basic understanding of variable-load fracturing and offers ideas and directions for future research and development.

Keywords variable load fracturing; breakdown pressure; failure energy; permeability; fracture geometry

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.02.004

0 引言

水力压裂作为一种通过向地层注入高压流体促使岩石发生破裂的增产手段,已广泛应用于石油、地热和煤炭等领域。然而,传统水力压裂面临诸多挑战,例如过高的破裂压力、潜在的断层滑移风险以及酸化压裂液对环境的污染等。因此,亟需开发新型压裂技术。变载荷压裂是一种通过物理或化学手段引起作用于地层岩石上的载荷周期性或随机变化的压裂施工形式,可以促进岩石发生破裂或形成多裂缝,从而达到显著增产增注的目的。变载荷含义是广泛的,包括压力、流体、温度以及高能气体等。变载荷压裂强调压裂过程中,流体、温度、高能气体等因素与岩石这种多孔介质之间的多场耦合作用,这区别于金属的机械疲劳破坏。这一概念包括但不限于循环压裂、脉冲压裂、爆燃压裂及其组合形式,概念范围更加广泛。

变载荷压裂的研究始于上世纪中叶,其发展历程遵循了由浅入深、日渐成熟的路径。在早期探索阶段,1956年Hulse^[1]提出了起裂前或起裂后循环压裂方案用以提高水力压裂效果。1964年德国普鲁士中央6矿采用脉冲注水方式,使得煤层孔隙度得以改善^[2]。1980

年美国桑迪亚实验室开展了油页岩爆炸实验,为油页岩开采进行了先导性研究^[3]。这些早期开创性探索让人们意识到变载荷有助于岩石发生破坏,增强裂缝穿透能力,为能源开采提供新的思路,亟需进一步开展基础性研究。

在基础研究阶段,变载荷压裂影响研究逐步从单一因素分析转向多因素考察。代表性成果包括Zhuang Li研究团队^[4-9]、张广清研究团队^[10-15]开展的系统研究,其从载荷形式、三向应力、矿物颗粒、岩石类型及循环次数等方面揭示了循环压裂对低渗透岩石破坏的影响机制。与此同时,变载荷压裂研究不局限于单一形式,呈现多元融合趋势,通过整合循环、脉冲、爆燃压裂各自的优势,创新性提出了疲劳水力压裂^[16]、多级爆燃压裂^[17]等新组合形式。理论研究范式也已突破传统疲劳力学的范围,通过融合岩石力学、断裂力学、渗流力学、气体动力学、多场耦合等多理论,显著推动变载荷压裂机理研究的纵深发展。研究表明,岩石在变载荷作用下的裂缝亚临界扩展主要与疲劳断裂和应力腐蚀有关。李全贵等^[18]和翟成等^[19]基于Miner疲劳损伤累积理论,结合高压脉动水楔效应,给出了不同压力幅值、加载频率下煤岩破坏的机理解释。Nilson等^[20-21]从流体力学和断裂力学角度出发,

系统分析了高温高压气体驱动裂缝动态扩展过程。

在工程应用阶段,随着研究深入和工程技术革新,变载荷压裂技术日渐成熟,在地下工程多个领域得以运用。在地热开采领域,德国 Zang 研究团队于 2017 年系统性提出了疲劳水力压裂的概念^[16]。韩国浦项增强型地热开采中进行了疲劳水力压裂现场测试,发现可以有效降低诱发地震的风险^[22-23]。在石油开采领域,国内张广清研究团队于 2017 年提出通过循环压裂形成复杂缝网的思想,形成了致密储层应力循环压裂技术^[11]。长庆油田鄂尔多斯盆地致密油 II 类储层运用该技术,有效改造体积增加 44.5%,投产初期日产油量提高到 2.6 t,达到了增产的目的^[24]。国内蒲春生研究团队提出了多级脉冲气体加载压裂技术,该技术使辽河油田欧 35-50-25 井地层破裂压力降低 26% 左右^[17]。在瓦斯抽采领域,针对煤层破裂压力高,压裂可控性差的问题,国内林柏泉研究团队提出高压脉动水力压裂卸压增透技术^[25],该技术在铁煤集团大兴矿 Sv719 工作面成功运用,其抽采流量是常规水力压裂的 1.75 倍^[19]。

对金属或复合材料而言,变载荷导致的破坏是一种需要预防和警惕的问题。然而,在地下工程领域,变载荷压裂则被视为一种有效促使岩石发生破坏、改造储层特性的方式。变载荷压裂不需要高性能的压裂设备,也无需引入腐蚀性压裂液,能够兼顾经济、环境和社会效益,在地下工程多个领域得到了验证性应用。本文以变载荷压裂特征研究为切入点,开展 4 方面论述:(1)变载荷压裂室内实验研究;(2)变载荷压裂特征和优势;(3)变载荷内在作用机制;(4)变载荷压裂研究问题及展望。通过系统梳理当前变载荷压裂

研究进展,概述其主要特征与应用优势,旨在为变载荷压裂提供基础性认知,并为未来研究发展提供思路 and 方向。

1 变载荷压裂实验研究进展

为研究变载荷压裂作用效果和内在机制,学者们开展了不同类型的变载荷压裂室内实验。如表 1 所示。本文总结了已有的代表性变载荷压裂实验的试件类型、变载荷形式、试件尺寸、研究因素、研究内容和分析方法。可见,室内实验试件类型涵盖了地热、石油和煤炭领域中的大多数岩石(花岗岩、砂岩、页岩、砾岩、致密碳酸盐岩、煤和水泥等)。圆柱、立方体和长方体是常见的试件形状,这主要取决于所施加的应力条件,如圆柱试件只能施加两向应力。为研究三向应力的影响,如图 1 所示,张广清研究团队^[14, 26]自主研发了真三轴水力压裂实验系统。最大应力可达 50 MPa。试件尺寸为 300 mm × 300 mm × 300 mm,大尺寸试件可减少边界效应的影响。

研究因素分为地质因素(三向应力、岩石类型、天然裂缝、结构各向异性等)和工程因素(载荷形式、压裂液类型、压裂液粘度、射孔、簇间距、作用次数等)两大类。图 2 展示了部分研究因素对变载荷压裂的影响。岩石类型和载荷形式会对破裂压力降幅造成影响。三向应力、簇间距、作用次数和天然裂缝则会影响裂缝形态特征。具体而言,施加三向应力,变载荷压裂后裂缝形态较为单一。较短的簇间距有利于起裂形成多条水力裂缝。液氮循环作用前期促使页岩产生多条分支裂缝,后期则几乎不再出现新裂缝。变载荷压裂

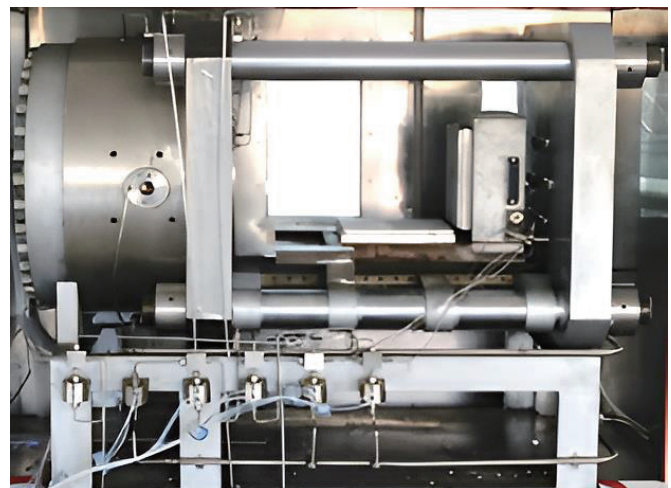
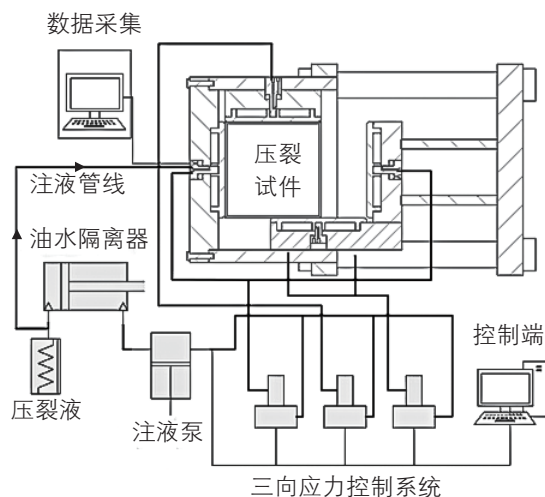
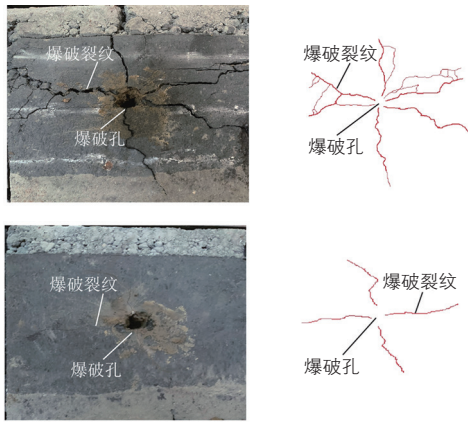
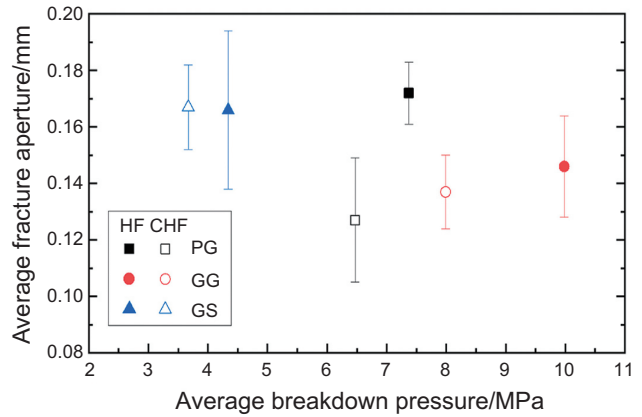


图 1 真三轴水力压裂实验系统^[14, 26]

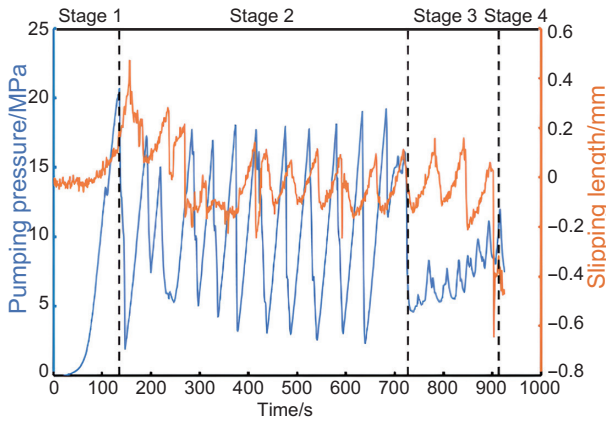
Fig. 1 True triaxial hydraulic fracturing experimental system^[14, 26]



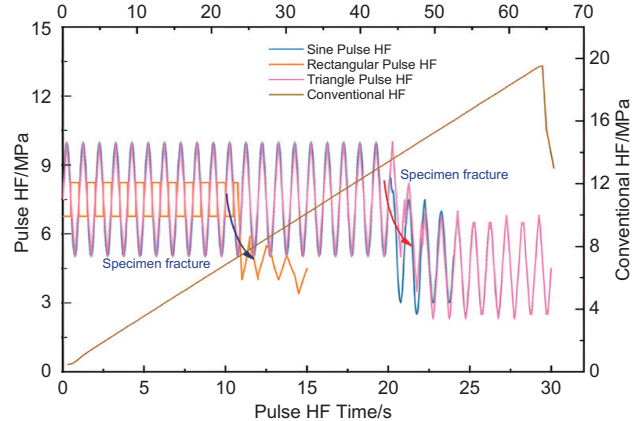
(a) 三向应力^[27]



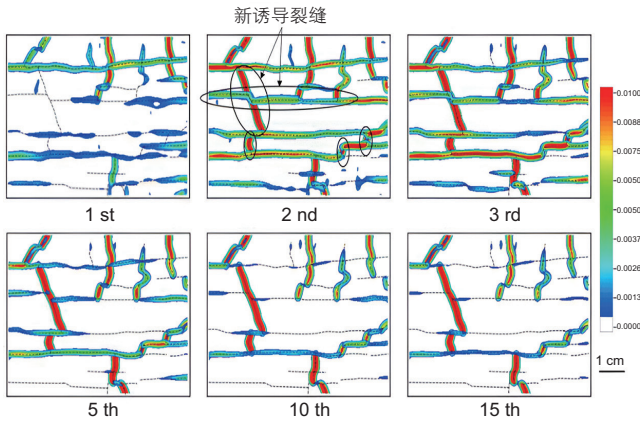
(b) 岩石类型^[4]



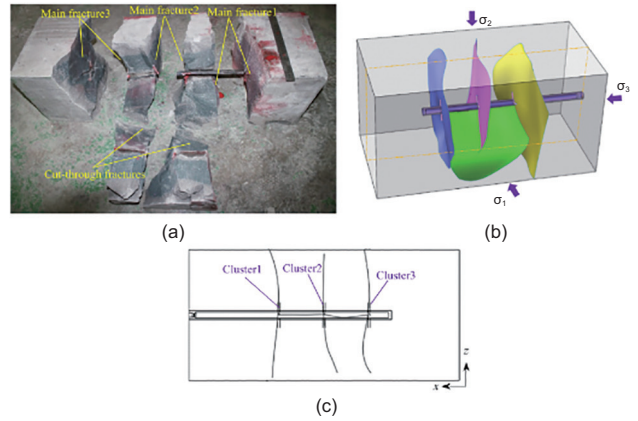
(c) 天然裂缝^[28]



(d) 载荷形式^[29]



(e) 压裂液类型^[30]



(f) 簇间距^[10]

图 2 不同研究因素对变载荷压裂的影响^[4, 10, 27-30]

Fig. 2 Influence of various factors on variable load fracturing^[4, 10, 27-30]

会诱导天然裂缝滑移，进而提高裂缝复杂性。其中，工程因素是可以人为控制的，所以是研究分析的重点，其中以载荷形式的研究最为突出。

不同的载荷形式是变载荷压裂区别于常规压裂的最显著的特点。如图 3 所示，本文归类总结了 6 种变载荷压裂形式。变载荷压裂要么直接改变压力，要么

通过调节排量其他方式来间接控制压力，本质上都是针对压力的变化。因此在划分载荷形式时，并不将此作为区分，而是以对岩石的力学作用效果为导向。另外，同一种变载荷中，三角波和方波等波形也不作细致区分。

根据是否考虑加速度的影响，将变载荷压裂分为

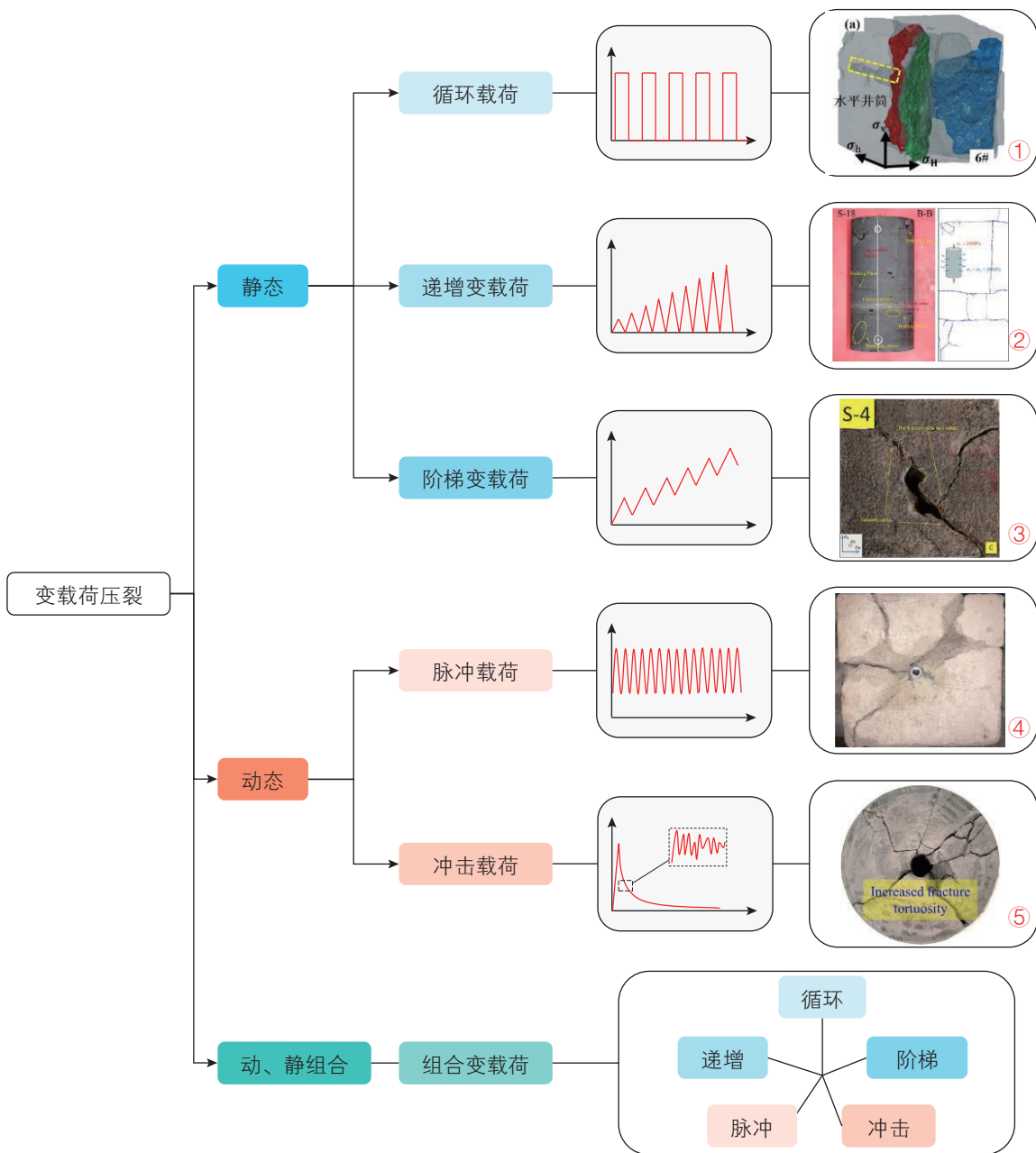


图 3 变载荷压裂形式(引用的实验结果①^[115]②^[31]③^[32]④^[33]⑤^[34])

Fig. 3 Forms of variable load fracturing(Experimental Results Cited ①^[115]②^[31]③^[32]④^[33]⑤^[34])

静态和动态以及静、动组合 3 类。静态变载荷压裂载荷作用时间相对较长，可分为循环、递增和阶梯 3 种形式。它们三者的区别在于载荷上下限是否固定。递增和阶梯载荷相较于循环载荷，其优势在于通过提高幅值，能够在保证疲劳损伤的基础上快速使岩石发生破裂，促使裂缝向前扩展，提高了载荷作用效率。

动态变载荷压裂，载荷作用时间相对较短，可分为脉冲和冲击两种形式，分别对应脉冲压裂和爆燃压裂。脉冲压裂表现为短时间内周期性载荷作用。爆燃压裂可在短时间内产生巨大冲击波和应力波，导致岩

石发生破坏。施加载荷的对象可以是火药、火箭推进剂或者高能气体。

组合变载荷压裂由静态载荷(循环、递增、阶梯)与动态载荷(脉冲、冲击)相互组合而成，涵盖静态—静态、静态—动态以及动态—动态等形式。例如疲劳水力压裂(循环+脉冲)和多级爆燃压裂(递增+冲击)。通过载荷组合的协同效应，能充分发挥不同载荷优势，针对不同工况进行压裂设计优化。

对于变载荷压裂，学者们主要关心两大问题：一是破裂时岩石破裂压力的变化及能量演化规律，分析

方法有注入压力曲线分析(IPC)、声发射分析(AE)等；二是破裂后岩石微观结构和裂缝形态的变化，分析方法有计算机断层扫描(CT)、扫描电子显微镜(SEM)、

数字图像相关技术(DIC)、3D扫描、压汞、图像识别、铸体薄片等。

表1 变载荷压裂实验研究总结

Table 1 A review of variable load fracturing experiments

试件类型	变载荷类型	试件尺寸/mm	$\sigma_v-\sigma_H-\sigma_h$ /MPa	研究因素	研究内容	分析方法	参考文献
花岗岩	循环	$D=50, H=100$	/	是否循环	破裂压力 裂缝形态 声发射分析	IPC CT AE	[35]
花岗岩	组合式 阶梯式	$100 \times 100 \times 100$	4-6-3	载荷形式	破裂压力 裂缝形态 声发射分析	IPC AE CT 铸体薄片	[9]
花岗岩 致密砂岩	循环	$D=50, H=100$	10-0-0	岩石类型	破裂压力 裂缝形态 声发射振幅	IPC CT AE 铸体薄片	[4]
致密砂岩	阶梯式	$D=4 \text{ in}, H=5.5 \text{ in}$	1500-3000-500 psi	是否循环	破裂压力 裂缝形态 渗透率 声发射分析	IPC SEM AE	[36]
致密砂岩	循环	$D=100, H=200$	56.5-50-50	是否循环	破裂压力 裂缝形态 声发射分析	IPC 3D扫描 AE	[37]
页岩	循环	$D=25.4, H=50.8$	20-10-10	是否循环	压力分析 裂缝形态 渗透率 声发射分析	IPC 渗透率 测试AE	[38]
页岩	循环	$D=50, H=20$ $140 \times 100 \times 50$	/	液氮 三向应力 层理 饱和状态 作用次数	裂缝形态 裂缝参数 声发射分析	DIC AE	[30]
页岩	阶梯式	$D=100, H=200$	24-20-20	载荷形式	破裂压力 裂缝形态 声发射分析	IPC CT AE	[31]
页岩	脉冲	$200 \times 200 \times 150$	8-0-0	载荷形式	破裂压力 裂缝形态 声发射分析	IPC AE	[29]
煤	脉冲	$D=50, H=100$	15-8-8	N_2 脉冲次数	孔隙结构 应变分析	应变曲线 压汞	[39]
煤	脉冲	$D=100, H=100$	/	载荷形式	气体扩散运移	驱替 解吸	[40]
煤 水泥	冲击	$300 \times 300 \times 300$	12.31-10.77-6.15	三向应力	裂缝形态 声发射分析	直接观察AE	[41]

(续表)

试件类型	变载荷类型	试件尺寸/mm	$\sigma_v - \sigma_{II} - \sigma_{III}$ /MPa	研究因素	研究内容	分析方法	参考文献
煤 水泥	冲击	300 × 300 × 300	/	三向应力	裂缝形态	图像识别	[27]
水泥	循环	300 × 300 × 600	13-12-6	载荷频率 压裂液 粘度 射孔数量 簇间距	压力分析 裂缝形态 声发射分析	IPC AE	[10]
水泥	循环	300 × 300 × 300	25-23-15	排量 天然裂缝	压力分析 天然裂缝滑移	IPC FIB	[28]
水泥	脉冲	150 × 150 × 150	3.56-2.7-2.1	脉冲次数 应力比	裂缝形态 力学参数	直接观察	[33]
水泥	冲击	$D=600, H=600$	/	CO ₂	裂缝形态	IPC 直接观察	[42]
水泥	冲击	$D=800, H=800$	/	炸药量 三向应力	裂缝形态	分形维数	[43]
砾岩	循环	200 × 200 × 200 300 × 300 × 300	/	岩石类型 载荷形式 三向应力	破裂压力 裂缝形态 裂缝扩展 裂缝参数	IPC 3D扫描	[15]
碳酸盐岩	循环	$D=2 \text{ in}, H=2 \text{ in}$	/	100 °C 热化学流体	破裂压力 裂缝形态 力学参数	IPC CT 划痕实验	[44]
人造岩石	递增式阶 梯式	120 × 120 × 120	/	结构各向异性 三向应力 载荷形式	破裂压裂 裂缝形态	IPC CT	[32]

2 变载荷压裂特征

变载荷压裂研究涉及煤炭、石油及地热等多个领域,各领域对变载荷形式下压裂特征的分析有所侧重。为确保对变载荷压裂特征的总结尽可能全面,同时力求兼顾各领域关注重点。本章根据变载荷对岩石破裂前后的影响,总结了破裂时破裂压力和破裂能量,以及破裂后渗透率和裂缝形态特征。

2.1 降低岩石破裂压力

非常规地层表现为高应力、高孔隙压力、强构造作用和强致密性,导致地层破裂压力过高,这给压裂施工作业带来了新的困难和挑战。除了提高压裂设备性能外,变载荷压裂在一定程度上可以降低地层破裂压力。通过对花岗岩、砂岩、页岩、碳酸盐岩、水泥等实验结果进行统计,发现与常规压裂相

比,变载荷压裂可使岩石破裂压力降低 10%~30%左右^[4, 6-7, 31, 36-37, 45-46]。若配合热化学流体作用,降幅甚至可达 69%^[44]。

不同岩石类型的破裂压力降幅表现有所不同。在相同应力条件和注入方式下, Pocheon 花岗岩、Gonghe 花岗岩和 Gray 砂岩破裂压力分别降低 15.7%、19.9% 和 12.2%^[4]。对于同一类型岩石而言,须家河致密砂岩破裂压力降幅要比疏松砂岩的多 11.72%^[46]。水泥试件致密程度越高,破裂压力降幅越大^[45]。

不同变载荷形式对岩石产生不同程度的刺激,也会影响岩石破裂压力。对于龙马溪页岩而言,递增变载荷可使破裂压力降低 24%,间歇式递增变载荷则降低 22%^[31]。爆燃压裂可使致密砂岩破裂压力降低约 17%^[47]。矿场实验表明递增变载荷下花岗岩破裂压力降低了 30%,组合变载荷下的破裂压力降低了 15%^[48]。岩石破坏所需的作用次数受注入方式的影响。设定的注入压力上限越低,作用次数越多^[37]。作用次

数增加, 疲劳损伤累积增多, 易诱发岩石发生破坏。无论是室内实验还是矿场研究, 都发现破裂压力随作用次数的增加而降低^[44, 46, 49]。

应力状态、含水饱和度、压裂液类型等因素与变载荷耦合作用同样不可忽略。考虑三向应力状态, 变载荷(循环和递增)压裂可使Pocheon花岗岩破裂压力平均降低13.4%^[7], 降幅比单向应力状态下的要小。饱和的Tennessee砂岩, 递增变载荷下破裂压力无明显变化^[36]。对于碳酸盐岩而言, 循环压裂中使用热化学流体可使破裂压力降幅高达33%~69%, 降幅与作用次数呈正相关^[44]。

与常规压裂相比, 变载荷压裂能够降低岩石破裂压力。一是加卸载作用促使裂缝尖端发生疲劳破坏。二是对于循环压裂而言, 注入持续时间长, 压裂液渗透范围广, 涵盖不同矿物颗粒和天然微裂缝, 矿物颗粒界面和微裂缝等薄弱处最易发生破坏^[7]。三是对于高孔隙度岩石而言, 强渗透性使其在循环初期达到饱和状态。饱和作用一方面导致岩石胶结弱化, 抗拉强度降低^[4], 另一方面增大了孔隙压力因而有效应力减小。两者最终导致破裂压力下降。四是应力腐蚀作用, 在应力作用下压裂液与岩石发生化学反应, 破坏了岩石内部组构, 降低了岩石强度^[12]。

2.2 降低岩石破裂能量

水力压裂存在促使断层活化, 增大诱发地震风险的可能性。声发射/微震监测技术能够捕捉水力压裂中岩石变形和破坏所产生的声波和微震信号, 分析裂缝的萌生与扩展特征, 以评估诱发地震的可能性, 提供及时预警^[50-51]。从能源开采成本、社会影响角度来看, 如何有效降低水力压裂引发的地层活动性至关重要。

声发射振幅可作为岩石破裂过程中能量释放的参考指标, 因为能量通常与振幅的平方成正比。与常规压裂相比, 变载荷压裂下花岗岩声发射最大振幅降低范围在6.8~26 dB之间^[4, 5, 7, 35]。影响降幅的因素有渗透率和变载荷形式。渗透率越低的花岗岩, 最大振幅下降越明显^[4]。递增变载荷(压力)下声发射最大振幅平均降低6.8 dB, 循环载荷(压力)下则降低8.6 dB。最大声发射振幅随着作用次数的增加而减小^[51]。从不同岩石降幅比例来看, 花岗岩最大幅值降幅约20%^[6], 龙马溪页岩降幅约26%^[38]。

震级是水力压裂现场用来表征微震强度的指标。2017年8月, 韩国浦项进行了变载荷压裂, 并配合使用了“交通灯”风险预警系统。在压裂过程中, 发生了一次最大震级为 M_w 1.9的地震事件, 低于“交

通灯”风险预警系统设定的 M_w 2.0警戒值, 也低于该井先前常规压裂处理中监测到的最大震级 M_L 2.3震级^[22-23]。Groß Schönebeck循环水力压裂实验结果表明, 压裂过程中地震活动性非常低, 震级在 M_w 1.0~1.8之间^[52]。变载荷压裂能够保持较低的地震活动性, 降低诱发微震事件震级。然而, 在如何调整注入参数以实现最大震级的最小化方面, 仍需进一步优化^[35]。

除了振幅/震级外, 声发射事件数也是衡量岩石破坏活动性的一个重要指标。张广清研究团队对多簇射孔多级循环压裂进行了分析^[10, 53]。声发射在时间和空间范围内的分布情况如图4所示。从时间维度来说, 声发射事件发生在每个循环压力上升至临近峰值阶段, 当注入压力上升到更高水平时, 声发射事件的数量会进一步增加。Wu等^[37]也持类似的观点, 即声发射事件在注入早期零星出现, 在接近破裂压力时急剧增加, 呈明显的阶梯式上升。从空间维度来说, 声发射事件的定位并非分布在裂缝的延伸路径附近, 而是遍布在试件的各个区域, 根据亚临界裂缝理论, 同一固体材料在受到低于其本身强度的载荷时, 其内部也会起裂亚临界裂缝, 从而在试件内部产生声发射事件^[54-56]。

本实验中的声发射监测结果揭示了裂缝数量、声发射事件数以及注入压力之间的关联性。无论是循环压裂还是常规压裂, 当有多裂缝起裂时, 会伴随着声发射事件数的增加以及注入压力的增长, 而这种趋势在循环压裂中变得尤为显著。相对于常规压裂, 循环压裂下声发射事件数明显增多。这种现象也与前人观察结果相一致^[35-36]。

b 值是声发射小事件数与大事件数的比值。变载荷压裂的 b 值比常规压裂的更大, 这表明声发射活动主要表现为小震级事件^[49, 57]。变载荷压裂一方面能够降低地层破坏时最大震级, 另一方面则通过产生大量的小震级事件代替剧烈单一的大震级事件, 从而减少对地层的影响, 缓解诱发地震的风险^[38, 49, 58-59]。

2.3 改变岩石渗透率

非常规储层的低孔低渗特性限制了流体流动, 导致自然产能低, 增加了规模开发难度。水力压裂能否提高储层渗透性是其成功应用的关键, 因此有必要考察变载荷压裂对岩石渗透率的影响。

一部分研究结果表明变载荷压裂能够显著提高岩石渗透率。Tennessee砂岩的递增变载荷压裂结果表明, 递增变载荷压裂下的裂缝过程区范围大约是常规压裂的2倍, 渗透率可提高3~10倍^[36]。对于花岗岩而言, 采用组合变载荷压裂后的渗透率达到了常规压

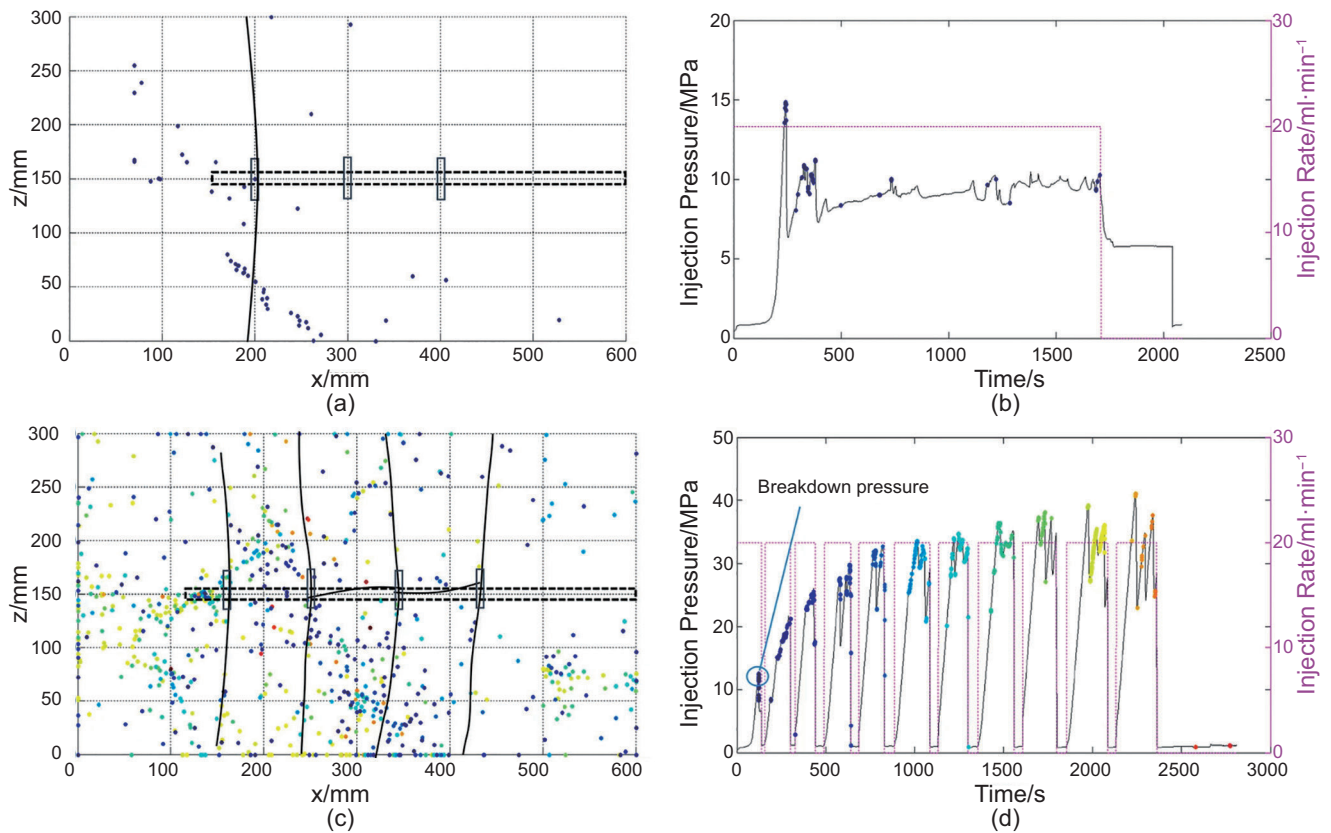


图4 声发射与裂缝形态(左); 注入压力、排量和声发射对应关系(右); (a)(b)常规压裂; (c)(d)循环压裂^[10, 53]

Fig. 4 AE and fractures (left); Relationship between pressure, injection rate, and AE (right); (a)(b) Continuous injection; (c)(d) Cyclic injection^[10, 53]

裂的5倍^[48, 60]。因而Zang等认为在增强型地热开发领域组合变载荷压裂是提高渗透率效果最好也是最有前景的方式。在瓦斯抽采领域,普遍认为通过脉冲载荷作用可显著提高煤层的渗透性。最直观的表现就是煤的孔隙结构发生了变化。CT扫描结果显示,脉冲压裂可使煤的孔隙度提高80%~100%^[61]。采用脉冲氮气压裂方式,煤的多种孔隙类型的孔隙体积都有所增大。其中,微孔的累积孔隙体积增加了52.8%。煤内部孔隙结构得到有效改善,渗透率呈上升趋势^[39]。

然而有些研究结果则认为变载荷压裂增渗效果并不明显,甚至是弱于常规压裂。Zhuang等使用了Pocheon花岗岩圆柱试件,在零围压下开展了循环压裂实验,实验结果表明循环压裂下增渗效果不如常规压裂^[6]。进一步地,又开展了应力差为10 MPa的真三轴水力压裂实验,发现循环压裂和递增变载荷压裂的增渗效果依旧不如常规压裂^[7]。龙马溪页岩循环压裂实验也得到了类似的结果^[38]。

目前,大多数研究表明变载荷压裂有助于提高岩石渗透率,但也有少数研究结果显示其增渗效果不佳,存在一定的争议。从作用机制上讲,认为增渗效

果差的原因是循环压裂产生的裂缝长度较短且孔径相对较小。而认为增渗效果显著的原因是在循环作用下裂缝壁面上的颗粒发生疲劳破坏而剥落,在裂缝中充当天然支撑剂,从而增大了渗透率^[35],这点从花岗岩铸体薄片上得到了证实^[9]。此外,脉冲作用下煤的孔隙结构得到改善,进而渗透率显著增加。这主要体现在以下3个方面:一是原始孔隙的扩张,二是因疲劳损伤产生的新孔隙,三是脉冲刺激下孔隙堵塞物被移除^[62]。

造成这种矛盾性认识可能与岩石类型和变载荷形式有关。像煤这种典型的双重孔隙介质,孔隙、裂隙相对花岗岩等致密岩石更加发育,因此对变载荷作用的反应更为敏感。另外,Zhuang等^[9]针对同一花岗岩比较了6种变载荷形式下的渗透性,发现不同形式下促进或抑制增渗的情况均存在。下一步有必要分析同一变载荷压裂形式下不同岩石类型的增渗效果,以确定岩石类型的影响。也可进一步分析多种类型岩石对不同变载荷压裂形式的增渗反应,以探究内在作用机制。

2.4 产生复杂裂缝形态

复杂的水力裂缝网络能够显著改善流体流动条件,增加资源可采性,从而有效提升储层的产量。变载荷压裂可以产生复杂裂缝。接下来将从多裂缝、裂缝形态、断裂形式和影响因素4个方面进行阐述。

变载荷压裂易产生多条裂缝。常规压裂作用时间短,往往产生单一裂缝。对于循环压裂而言,特别是作用次数较多情况下,压裂液有充足时间渗入岩石内部,产生微裂缝,并促使内部天然弱面发生破坏,微裂缝与弱面相互贯通,形成宏观裂缝。在循环过程中压裂液可以沿多个微裂缝方向进行渗透,因此循环压裂下倾向于产生多条裂缝^[8],如图5所示。在多簇循环压裂中,更多射孔簇起裂形成多条水力裂缝^[10]。正弦、三角、矩形脉冲压裂可使页岩产生2~4条裂缝^[29]。在相同围压条件下,当炸药量从10 g增加到20 g时,压裂所形成的裂缝数量由6条增至12条^[43]。

变载荷压裂下裂缝形态复杂。张广清研究团队认为循环压裂形成的复杂裂缝主要分为从井筒壁面起裂多裂缝和水力裂缝分叉两种^[53]。从微观层面上看,主裂缝周围存在大量近似平行的分支微裂缝^[12]。Zang等^[49]认为常规压裂发育对称双翼裂缝,循环压裂则发育多分支、小孔径和高迂曲度的裂缝。花岗岩三维CT扫描重构表明,与常规压裂相比,循环压裂下裂缝体积由19 mm³增加到78 mm³,平均孔径由0.106 mm减

少到0.073 mm,迂曲度由1.10增加到1.76^[63]。频率会影响裂缝扩展方向。高频脉冲压裂的裂缝主要沿最大水平主应力方向,而低频脉冲压裂则导致裂缝扩展方向呈现随机性^[64]。在爆燃压裂中,聚能流体可使页岩主裂缝周围产生纵横交错的分支缝^[65]。温度循环作用同样也会增加裂缝复杂性。如图6所示,液氮超低温循环作用后,当页岩表面含有层理时,裂缝主要沿着平行层理方向产生;当页岩表面无层理时,裂缝网络形态类似于龟裂^[30]。

变载荷压裂可影响岩石断裂形式。花岗岩CT扫描切片中可以发现常规压裂下沿晶断裂占比平均为15.48%,循环压裂下平均为31.66%。虽然两种压裂方式下裂缝仍主要表现为穿晶断裂,但是循环压裂下裂缝有机会选择阻力更小的扩展路径,由于界面强度远小于晶体强度,因此沿晶断裂占比升高^[7]。随着循环作用次数的增加,沿晶断裂占比随之升高^[4]。沿晶断裂的占比还与花岗岩矿物类型有关。在相同循环压裂形式下,Gonghe花岗岩沿晶断裂占比要比Pocheon花岗岩高,这是因为Gonghe花岗岩板状黑云母含量高,易沿黑云母界面发生断裂,而Pocheon花岗岩石英含量较高,易发生穿晶断裂。就拉剪破坏模式上看,花岗岩在常规压裂、递增变载荷压裂和循环压裂下的拉伸破坏占比分别为67%、61%和52%。拉伸破坏占比随着作用次数的增加而减少^[51]。从侧面说明变载荷压裂促使岩石发生剪切破坏。

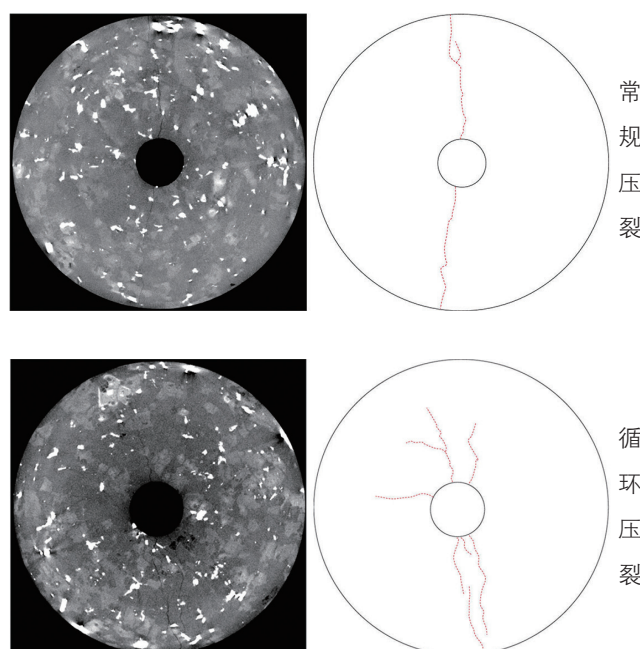
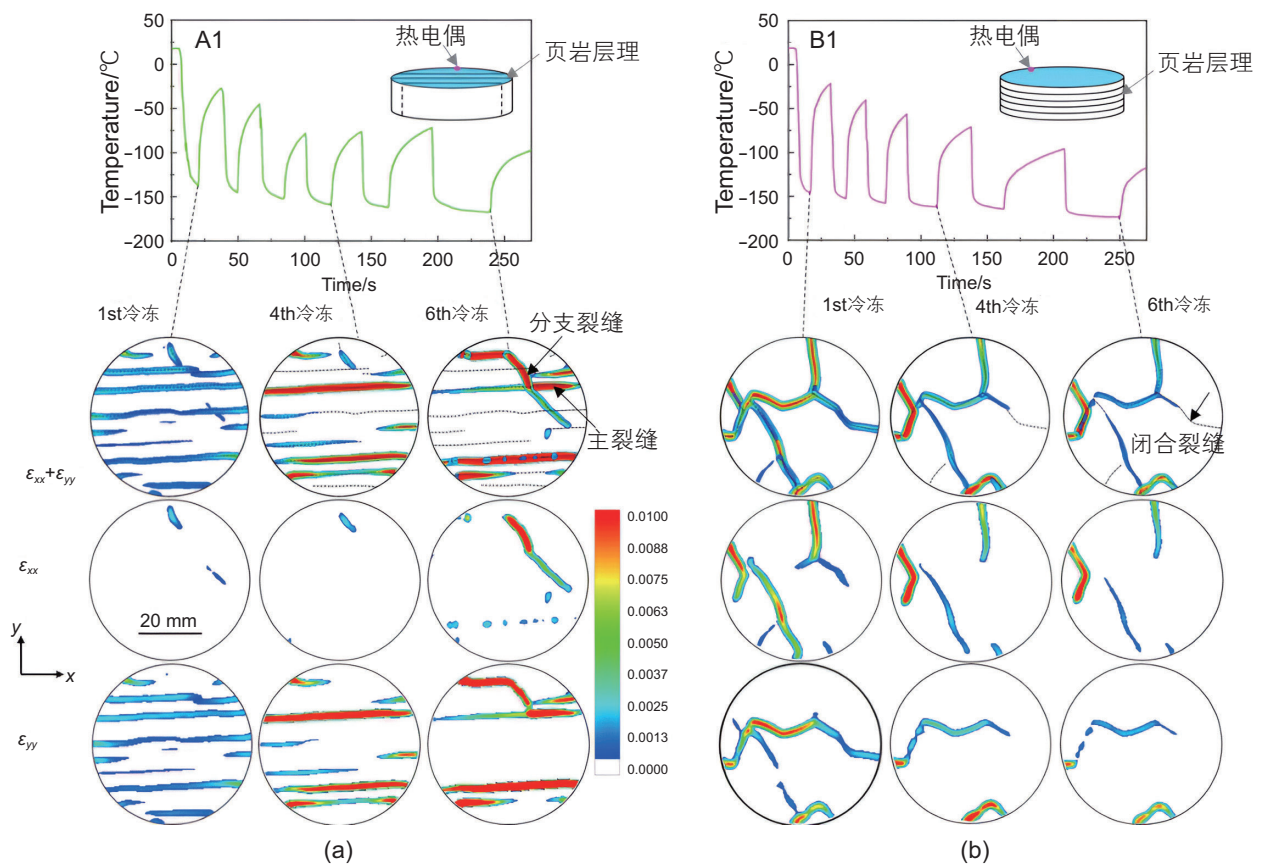


图5 花岗岩常规压裂与循环压裂所形成的裂缝对比^[8]

Fig. 5 Comparison of fractures formed by conventional fracturing and cyclic fracturing in granite^[8]

图6 页岩液氮循环诱导裂缝^[30]Fig. 6 Induced fractures in shale by cyclic liquid nitrogen injection^[30]

明确复杂缝网影响规律可用于指导实际变载荷压裂设计。张广清研究团队^[11, 53]使用 300 mm × 300 mm × 600 mm 的长方体水泥试件, 针对三向应力、作用次数、频率、裸眼段长度、压裂液粘度等因素开展了循环压裂影响性分析, 如图 7 所示。

结果表明: 水平应力差增加, 从主裂缝起裂分支缝的阻力增加, 即便是能够产生分支缝, 分支缝也会再次与主裂缝汇合, 这大大增加了形成复杂缝网的难度。Liu 等^[66]也认为水平应力差较小时, 循环压裂可以形成多分支、多方向裂缝。在一定范围内, 增加作用次数, 所形成多裂缝波及范围也会增加。当注入频率由定频改为变频时, 缝网形态更加复杂。之前的结果认为高应力差不利于形成复杂裂缝, 而采用变频循环压裂是有可能突破高应力差 ($\Delta\sigma \geq 5$ MPa) 的限制, 形成复杂裂缝的。增加裸眼段长度, 即增加了井筒与地层之间的接触面积, 可更直接向地层传递压力波动, 促进分支裂缝的产生, 甚至也可以突破较高应力差 (5~6 MPa) 的限制形成复杂裂缝。低粘度的清水压裂液更易产生复杂裂缝。高粘胍胶压裂液只产生 1 条平直裂缝。

其他学者也研究了排量、天然裂缝等因素的影响规律。循环频率和排量之间存在匹配关系。在低排量下, 高频注入可形成短小而复杂的裂缝网络。而在高排量下, 过高或过低频率都易产生简单的长裂缝^[66]。随着循环压裂排量幅值的增大, 煤的孔隙度和连通性增加, 造成的破坏性更为显著^[67]。Hu 等^[68]研究表明循环压裂倾向于在岩石基质中产生裂缝, 而阶梯式变载荷压裂倾向于激活天然裂缝。Wei 等^[69]研究发现低频脉冲压裂下, 水力裂缝易受天然裂缝影响, 形成复杂缝网。而高频脉冲压裂下水力裂缝与天然裂缝之间的相互作用与常规压裂基本相同。

岩石自身结构和性质也会影响裂缝的复杂形态。在循环压裂下, 花岗岩中产生的复杂裂缝形态与其自身矿物类型、粒径和非均质性是密切相关的。例如板状黑云母晶体, 在促使花岗岩发生更多沿晶断裂的同时, 还使得裂缝路径更加曲折, 偏离最大主应力方向^[4]。碳酸盐岩在循环压裂下与热化学流体发生充分的化学反应, 产生了条带状和放射状的组合裂缝^[44]。砂砾岩起裂后循环压裂通过作用在裂缝面上的循环载荷促进砂砾岩的非均匀变形, 有利于形成多裂缝^[15]。

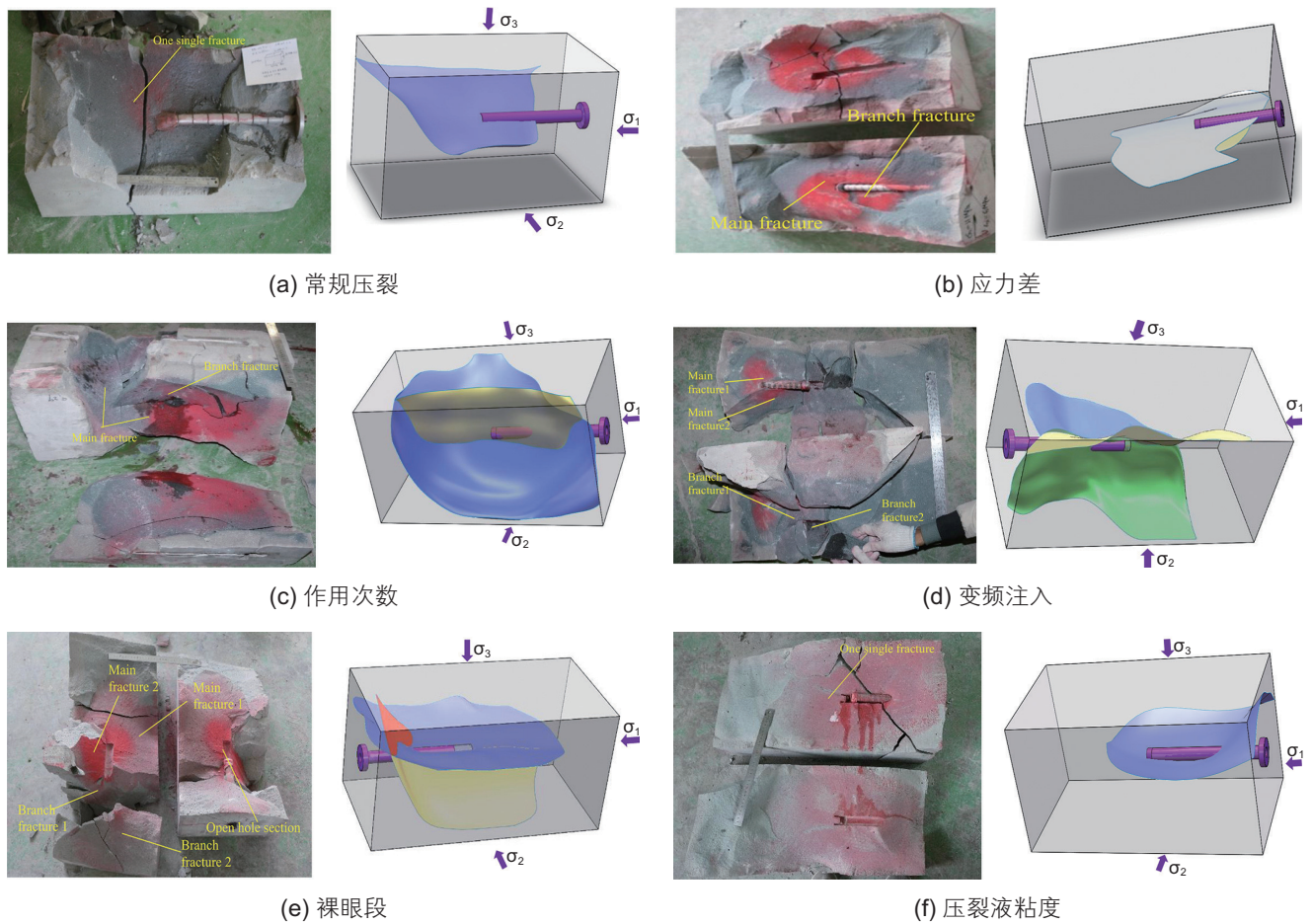


图7 循环压裂中各因素影响下的裂缝形态^[11, 53]

Fig. 7 Fractures induced by various factors in cyclic fracturing^[11, 53]

3 变载荷内在作用机制

不同类型的变载荷压裂, 其内在作用机制各不相同。静态变载荷压裂的显著特点是在较低压力下裂缝延伸形成复杂缝网。在断裂力学中, 裂缝在尖端应力强度因子低于断裂韧性时, 仍能以一定速度向前扩展, 这种现象称为亚临界扩展。疲劳断裂和应力腐蚀是裂缝发生亚临界扩展的常见机制^[56, 70-74]。动态变载荷压裂主要依托爆炸力学、流固耦合、气体动力学、断裂力学基本理论, 建立相关的裂缝起裂扩展模型。

3.1 岩石疲劳模型

在循环载荷作用下, 材料会发生局部渐进式损伤, 称之为疲劳^[75]。与常规破坏相比, 疲劳破坏具有2大特点。一是发生疲劳破坏的载荷远低于静态峰值载荷; 二是疲劳破坏事先没有强烈的预警信号^[35]。对于金属材料而言, Paris和Erdogan提出了描述金属I型疲劳断

裂行为的Paris公式^[76], 如式(1)所示。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^m \quad (1)$$

式中, a 为裂缝长度, N 为循环次数, C 和 m 是与实验条件相关的材料常数, ΔK_I 是应力强度因子幅度。Paris公式表明疲劳裂缝扩展受裂缝尖端的弹性应力强度因子幅度影响, 两者之间存在幂函数关系。

与金属不同, 岩石类材料属于准脆性材料, 要想运用Paris公式, 需要做适用性修正。因此, 学者们考虑应力比^[77]、尺寸效应^[78-79]、加载频率^[80-81]、材料强度^[82]、裂缝扩展阻力^[83-85]等因素, 分别提出了不同的Paris修正公式。例如, Sakhace-Pour^[86]和Agrawal^[87]为预测循环压裂中的破裂压力, 考虑了应力比影响, 得到了修正的Paris公式, 如式(2)所示。采用该公式预测的破裂压力值与实测值相比, 误差不超过15%。

$$\frac{da}{dN} = C(U\Delta K)^m; \quad U = 0.5 + 0.4R; \quad R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (2)$$

式中, U 为Elber常数, R 是应力比, K_{\min} 和 K_{\max} 分别是最小和最大应力强度因子。

区别于金属断裂, 岩石类材料存在较大的断裂过程区(FPZ), 这直接影响了岩石类材料的裂缝扩展行为。而Paris公式是基于线弹性断裂力学提出来的, 无法考虑FPZ的影响, 这大大限制了Paris公式在岩石类材料中的运用。因此在Paris理论基础上, 张广清研究团队^[88-89]主要聚焦于循环载荷下FPZ发育情况, 建立了FPZ长度增长率、声发射能量增长率、等效应力强度因子三者之间的关系。FPZ长度增长率与等效应力强度因子的关系:

$$\frac{dL}{dN} = C(\Delta K_{\text{eff}})^m \quad (3)$$

式中, L 为FPZ长度, N 为循环次数, C 和 m 是材料常数, ΔK_{eff} 是等效应力强度因子幅度, 可根据ISRM推荐方法计算^[90]。声发射能量增长率与等效应力强度因子的关系:

$$\ln \frac{dE}{dN} = C(\Delta K_{\text{eff}})^m \quad (4)$$

式中, E 为声发射能量。

由此可见, FPZ长度增长率与声发射能量增长率都与等效应力强度因子呈幂函数关系, 形式上基本相同。进一步地, 我们给出了FPZ长度增长率与累积耗散能增长率之间的函数关系:

$$\frac{dL}{dN} = \left(\frac{1}{2}C_G\right)L^{-1}\left(\frac{dG_D}{dN}\right) \quad (5)$$

式中, G_D 为FPZ内所有微裂缝的累积耗散能。 C_G 为材料常数。该模型揭示了裂缝尖端局部力学响应特征。随着作用次数的增加, FPZ内部微裂缝增多, 耗散的能量增多, 累积耗散能增长率增大, FPZ长度增长率也随之线性增加。该模型计算结果与实验数据拟合度可达84%。

由于岩石类材料断裂过程区具有高度非线性的特点, 特别是在循环载荷作用下, 其内部力学响应更为复杂, 仅仅依靠线弹性断裂力学理论是不够的。Barenblatt和Dugdale提出了内聚力模型, 这是弹塑性断裂力学中一个常用的计算模型。然而, 内聚力模型本身是无法描述疲劳断裂的, 为此学者们相继提出了不同的修正内聚力模型。

构建疲劳内聚力模型的关键是要引入疲劳损伤因子, 同时要处理好与内聚力模型自身损伤因子的关系。表征疲劳损伤的累积, 通常是采用强度退化或刚度折减来实现^[91-92]。Nojavan等^[93]认为强度退化决定了疲劳裂缝萌生, 刚度退化决定了疲劳裂缝扩展。然而这些模型都假设沿卸载路径会返回到原点, 这实际上是

不合理的, 因为随着作用次数的增加, 不可逆的位移量会增多。基于此, Xi等^[94]考虑了准脆性材料低周疲劳引起的不可逆位移, 提出了一种非线性疲劳内聚力模型, 疲劳参数可由S-N曲线确定。

与机械循环载荷类似, 循环水力压裂中流体压力的变化, 同样会引起裂缝尖端的反复闭合。流体压力升高, 裂缝尖端形成断裂过程区, 消耗了部分水力能量, 产生了非弹性变形。流体压力下降, 过程区变形不可完全恢复, 存在残余变形。随着作用次数的增加, 残余变形量增加, 微裂缝增多, 疲劳损伤累积, 岩石强度或刚度退化, 最终导致岩石发生疲劳破坏, 破裂压力降低。

3.2 应力腐蚀模型

与金属机械疲劳不同的是, 由于岩石存在天然的孔隙和微裂缝, 随着作用次数的增多, 流体渗透范围增大, 渗透作用不可忽略。具体表现为一方面流体长期饱和作用会使岩石胶结强度弱化, 导致岩石发生破坏。另一方面在流体介质环境中, 受应力作用的岩石会发生亚临界裂缝扩展, 即应力腐蚀。

Charles^[95]认为应力腐蚀的实质是在拉应力作用下, 原子间距离增大, 利于碱离子的扩散, 尤其是裂缝尖端应力集中, 扩散更为严重。由此, 提出了Charles公式:

$$v = \frac{da}{dt} = v_0 \exp\left(\frac{-H}{RT}\right) K_I^n \quad (6)$$

式中, v 为裂缝扩展速度, H 是活化焓(热函), R 是摩尔气体常数, T 是绝对温度, v_0 是常数。其中, n 又称为应力腐蚀因子, 是用来表征亚临界裂缝扩展的敏感性。 n 越小, 裂缝扩展越快。 n 受湿度、温度、流体介质等环境因素影响显著^[73-74, 96]。在液态水中的亚临界裂缝扩展速度远高于在空气中的^[97-99]。对于大多数岩石而言, n 的经验性取值范围在10~50之间^[72]。

Wiederhorn和Bolz^[100]认为应力腐蚀是由裂缝尖端和环境中的物质之间发生化学反应引起的。由此, 提出了如下公式:

$$v = v_0 \exp\left[-H + \frac{2v^* K_I}{(\pi r_c)^{1/2}}\right] / (RT) \quad (7)$$

式中, v^* 为应力腐蚀活化体积, r_c 是裂缝尖端曲率半径。应力腐蚀使得裂缝尖端曲率降低, 说明裂缝应力集中程度增大, 有利于发生破坏, 所以导致亚临界裂缝扩展速度增大。公式(6)通过调整参数可描述裂缝扩展速度与尖端应力强度因子关系曲线(K_I - v 曲线)的全部阶段, 而公式(7)则仅可描述 K_I - v 曲线第一阶段。

随着作用次数的增多,岩石与流体之间相互作用更为频繁,在拉应力作用下发生离子交换,而且裂缝尖端与压裂液发生化学反应使得曲率下降,两者共同作用下都促使岩石发生亚临界扩展。

3.3 爆燃压裂裂缝扩展模型

与静态变载荷压裂研究思路类似,爆燃压裂的理论分析由最初仅考虑应力作用,发展为综合考虑气—液—固三相耦合作用,进而建立了更为全面的裂缝扩展动力学模型。

最初,学者们认为爆燃压裂主要是通过应力波的形式作用于岩石,因此建立了Favrean模型^[101]、NAG-FRAG^[102]和Kuzmaul模型^[103]等。然而,随着研究的深入,逐渐认识到不只有应力波的作用,气体/流体的影响同样不可忽略。因此,Nilson等^[20-21]在流体力学和断裂力学的基础上,考虑了气体与裂缝之间的热传导和渗流作用,对爆燃气体驱动裂缝扩展过程进行了分析。卢文波等^[104]对爆燃气体驱动下的裂缝扩展速度进行了理论计算,认为爆燃气体驱动裂缝非稳定扩展速度完全取决于气体在裂缝中的一维膨胀流动速度。Paine等^[105]通过建立爆燃压裂径向多裂缝扩展模型,给出了气体驱动下裂缝形态。

依照应力强度因子判据,李海涛等^[106]建立了爆燃压裂裂缝的起裂扩展模型。通过构建缝内气体压力分布函数,利用迭代法实现了模型的数值求解。模型认为,在裂缝扩展过程中,爆燃气体尖端与裂缝尖端经历了由重合到不重合再回到重合的动态变化过程。初始裂缝越长,爆燃气体能量利用率越高,裂缝扩展越长。

高能气体压裂涉及气—液—固三相耦合。结合爆燃气体动力学、岩石力学、流体力学和渗流力学的基本原理,蒲春生等^[107]建立了高能气体压裂过程中裂缝延伸动力学模型,如式(8)所示。可预测爆燃压力和裂缝延伸随时间的变化曲线。吴飞鹏等^[108]在此基础上进一步考虑了火药燃烧、压挡液柱运动、射孔孔眼泄流、裂缝起裂和裂缝延伸5个过程,建立了多级脉冲爆燃压裂动力学模型。

$$\left\{ \begin{array}{l} q dt = h_f \int_0^{L_f} \left(\rho_g \frac{\partial W_f}{\partial t} dt + W_f \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dt + \rho_g u_f dt \right) dx_f \\ \frac{(\rho_g c_g T + p)q}{\rho_g} dt = c_g T_f (dQ_f + dQ_g) + c_g Q_f dT_f + \\ h_f \int_0^{L_f} \left[(p_f + \sigma_f) \frac{\partial W_f}{\partial t} dt + W_f \frac{\partial p_f}{\partial t} dt + p_f u_f dt \right] dx_f \\ p_f M_g = \rho_g RT_f \end{array} \right. \quad (8)$$

4 变载荷压裂研究展望

尽管变载荷压裂已取得一些可喜的进展,要想成为一种成熟的压裂技术,得到大规模的推广和应用,还需要深入地研究,解决当前存在的问题,推动技术不断向前发展。

4.1 变载荷与岩石结构特征关系

渗透率直接关系到能源开采的产量。变载荷压裂对岩石渗透率的影响仍需进一步明确。现有研究表明,岩石类型和变载荷方式都会影响增渗效果。岩石作为多孔介质,不同类型的岩石有着不同孔隙和裂缝的结构特征,这对变载荷作用的响应有所不同。此外,不同载荷形式的作用时长、强度和次数各异,对岩石产生的刺激作用程度也有所不同,因此造成了岩石微孔隙、微裂缝的变形亦有不同,从而影响增渗效果。因此,在评价增渗效果时,建议考虑岩石自身微孔隙、微裂缝等结构特征,深入分析不同载荷方式对岩石增渗效果的影响,以探究其内在作用机制。

建立复杂裂缝网络是储层改造的关键。页岩油气作为非常规油气资源的主体,是变载荷压裂技术在非常规油气开发中得以大规模应用所绕不开的重要研究对象。然而,目前的研究大多集中在花岗岩、致密砂岩和水泥等各向同性材料,而针对页岩这一典型的横观各向同性岩石的研究仍较为有限。

页岩层理的存在增大了水力压裂改造的复杂性,压裂液易进入层理面,诱导层理变形,水力裂缝易沿层理方向发生偏转,限制了其缝高上的延伸和扩展,导致压裂规模小,难于达到预期改造效果。

在页岩储层进行变载荷压裂改造时,由于页岩自身层理结构和变载荷作用方式的特殊性,水力裂缝扩展可能会变得更加复杂。一方面可以探讨通过反复加卸载作用能否促使水力裂缝突破层理限制,提高裂缝高度;另一方面,可以研究变载荷压裂对页岩基质疲劳损伤作用,以及激活层理、天然裂缝的可能性。关注主裂缝、分支缝与层理、天然裂缝之间能否相互连通,从而形成复杂缝网。定量评价缝网特征,明确变载荷下页岩形成复杂缝网力学机理和影响机制,对页岩油气藏促产增效,实现高效开发具有重要意义。

4.2 复杂极端条件下变载荷压裂特征变化

近年来,在“双碳”目标背景下,国内油气勘探开发正向深层/超深层领域进军。随着开采深度的增

加,超高温、超高压、高地应力、低渗透、难动用等极端复杂地质环境,给油气开采带来了巨大挑战^[109]。

就压裂作业而言,深层/超深层复杂的多场赋存条件与水力能发生强相互作用,增大储层破裂难度。深层/超深层岩石致密坚硬,具有高强度和高韧性,其力学行为从弹脆性向粘弹塑性转变,表现为复杂非线性特性,伴随能量耗散增加。随着埋藏深度增加,能量损失进一步加剧,施加于岩石上有效压裂能量减少。这都导致深层/超深层储层破裂极为困难,破裂压力甚至可达100 MPa以上^[37],储层难以破裂也意味着缝网形成难度大,裂缝均衡延伸困难,储层改造体积小,极大制约了深层/超深层油气高效开发。

变载荷压裂具备降低破裂压力、形成复杂裂缝的优势,可为深层/超深层油气开采提供解决方案。需要进一步评估变载荷压裂在深层/超深层储层中的可行性。分析超高温、超高压等极端条件与变载方式之间相互作用关系,关注变载荷压裂的四大特征产生的新变化及新的作用机理。这无疑是给变载荷压裂发展带来了新的机遇和挑战。

4.3 变载荷压裂多物理场、多尺度、多时度的综合研究

不同于机械疲劳作用下的金属,地下工程中的岩石常处于应力场、温度场、渗流场、化学场、磁场等多场耦合环境中。岩石微孔隙、微裂缝、结合水、矿物成分、力学参数等会发生显著改变,岩石表现为高度非线性变形和断裂行为。在变载荷扰动下,多场耦合作用只会更加复杂,对岩石的影响也愈加显著。受制于实验设备和水平,目前室内实验多为流固耦合,对其他物理场考虑不足。

地下工程中的岩石具有明显的多尺度特性。具体表现为,天然裂缝、层理、割理等地质结构呈现跨尺度特征;水力裂缝呈现空间多尺度组合分布特征;多尺度孔隙结构导致的多尺度渗流特征。目前研究尺度

大多在厘米至百米尺,对微纳米尺度下岩石断裂、渗流行为研究不足。

变载荷压裂是内含时间尺度概念的,所涵盖的时间尺度非常广泛。从变载荷类型上看,既包括短时间爆燃压裂,也有长时间的循环压裂,以及长短时间结合的组合式变载荷压裂。在不同时间尺度下,压裂过程中地层能量和变形会发生不同程度的动态调整。地层岩石微观结构、多物理场、多尺寸裂缝及多尺度渗流特征也会不断演化。目前对于长时间蠕变—疲劳力学行为的研究仍显不足。

结合上述研究的不足之处,后续研究应进一步完善实验条件,引入纳微观分析的实验设备,与数值模拟手段有机结合,从多场、多尺度、多时度角度综合分析变载荷压裂作用特征及内在机理。

5 结论

本文综述了目前变载荷压裂实验研究、压裂特征以及内在作用机制,并提出了未来研究展望。首先将变载荷压裂作用形式分为6种:循环、递增、阶梯、脉冲、冲击和组合。其次,实验研究的梳理聚焦于岩石破裂时破裂压力和破裂能量,以及破裂后渗透率和裂缝形态特征。基于此,归纳总结了4个变载荷压裂特征:降低岩石破裂压力、降低岩石破裂能量、改变岩石渗透率以及产生复杂裂缝形态。最后从岩石疲劳断裂、应力腐蚀、爆燃压裂裂缝扩展等方面对于变载荷压裂内在作用机制进行了探讨。

对于变载荷特征研究,要明确岩石结构特征对增渗效果及复杂裂缝形态的影响。需紧跟深层/超深层开发研究趋势,考虑复杂极端条件下变载荷压裂适用性和新变化,以拓宽变载荷压裂研究发展空间。力求实验、数值模拟、理论分析三者有机结合,从多场、多尺度、多时度角度综合分析变载荷压裂作用特征及内在机理。

参考文献

- [1] HULSE D S. Fracturing process with superimposed cyclic pressure: US, US2915122[P].1959.
- [2] 王耀锋,何学秋,王恩元,等.水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J].煤炭学报,2014,39(10):1945-1955. [WANG Y F, HE X Q, WANG E Y, et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1945-1955.]
- [3] GRADY D E, KIPP M E, SMITH C S. Explosive fracture studies on oil shale [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1980, 20(05): 349-356.
- [4] ZHUANG L, ZANG A, JUNG S. Grain-scale analysis of fracture paths from high-cycle hydraulic fatigue experiments in granites and sandstone [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 157: 105177.

- [5] ZHUANG L, KIM K Y, JUNG S G, et al. Cyclic hydraulic fracturing of pocheon granite cores and its impact on breakdown pressure, acoustic emission amplitudes and injectivity [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 122: 104065.
- [6] ZHUANG L, KIM K, JUNG S, et al. Laboratory evaluation of induced seismicity reduction and permeability enhancement effects of cyclic hydraulic fracturing[C]// *Proceedings of the ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA, 2017: ARMA-2017-0757.
- [7] ZHUANG L, KIM K, JUNG S, et al. Cyclic hydraulic fracturing of cubic granite samples under triaxial stress state with acoustic emission, injectivity and fracture measurements[C]// *Proceedings of the ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA, 2018: ARMA-2018-2297.
- [8] ZHUANG L, KIM K, JUNG S, et al. Laboratory study on cyclic hydraulic fracturing of Pocheon granite in Korea[C]// *Proceedings of the ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA, 2016: ARMA-2016-2163.
- [9] ZHUANG L, JUNG S G, DIAZ M, et al. Laboratory true triaxial hydraulic fracturing of granite under six fluid injection schemes and grain-scale fracture observations [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53: 4329-4344.
- [10] ZHOU Z, ZHANG G, XING Y, 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.
- [11] ZHOU Z, ZHANG G, DONG H, et al. Creating a network of hydraulic fractures by cyclic pumping [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 97: 52-63.
- [12] ZHOU D, ZHANG G, TANG M. Mechanisms of sub-parallel fractures under cyclic injection[C]// *Proceedings of the ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA, 2021: ARMA-2021-1733.
- [13] XU C, ZHANG G, ZHANG M. Striped and dispersive stress distributions induce multi-branch fractures in stimulating glutenite reservoirs [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2025, 246: 213575.
- [14] NIE Y, ZHANG G, WEN J, et al. Cyclic injection to reduce hydraulic fracture surface roughness in glutenite reservoirs [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142: 104740.
- [15] 徐常晔, 张广清, 彭岩. 砂砾岩循环注液水力裂缝扩展规律研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(08): 1966-1977. [XU C Z, ZHANG G Q, PENG Y. Study on the propagation law of hydraulic fracture by cyclic injection in glutenite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(08): 1966-1977.]
- [16] ZANG A, STEPHANSSON O, ZIMMERMANN G. Keynote: Fatigue hydraulic fracturing[C]// *proceedings of the ISRM EUROCK*, ISRM, 2017: ISRM-EUROCK-2017-2142.
- [17] 蒲春生, 孙志宇, 王香增, 等. 多级脉冲气体加载压裂技术 [J]. *石油勘探与开发*, 2008, (05): 636-639. [PU C S, SUN Z Y, WANG X Z, et al. Technique of multi-pulse gas load fracturing[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, (05): 636-639.]
- [18] LI Q, LIN B, ZHAI C, et al. Variable frequency of pulse hydraulic fracturing for improving permeability in coal seam [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, 23(6): 847-853.
- [19] 翟成, 李贤忠, 李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(12): 1996-2001. [ZHAI C, LI X Z, LI Q G. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology[J]. *Journal Of China Coal Society*, 2011, 36(12): 1996-2001.]
- [20] NILSON R H, GRIFFITHS S K. Similarity analysis of energy transport in gas-driven fractures [J]. *International Journal of Fracture*, 1986, 30(2): 115-134.
- [21] NILSON R, PROFFER W, DUFF R. Modelling of gas-driven fractures induced by propellant combustion within a borehole[C]// *Proceedings of the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier, 1985: 3-19.
- [22] KIM M, YOON B, LEE C, et al. Microseismic monitoring during hydraulic stimulation in Pohang (Korea) for EGS pilot project[C]// *Proceedings of the AGU Fall Meeting Abstracts*, 2017: S23B-0804.
- [23] HOFMANN H, ZIMMERMANN G, ZANG A, et al. Cyclic soft stimulation (CSS): a new fluid injection protocol and traffic light system to mitigate seismic risks of hydraulic stimulation treatments [J]. *Geothermal Energy*, 2018, 6(1): 1-33.
- [24] 李川, 张翔, 杜现飞, 等. 鄂尔多斯盆地致密油应力循环压裂技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2018, 40(04): 494-498. [LI C, ZHANG X, DU X F, et al. Stress-cycle fracturing technology suitable for tight oil reservoirs in the Ordos Basin[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018, 40(04): 494-498.]
- [25] 林柏泉, 李子文, 翟成, 等. 高压脉动水力压裂卸压增透技术及应用 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(03): 452-455. [LIN B Q, LI Z W, ZHAI C, et al. Pressure relief and permeability-increasing technology based on high pressure pulsating hydraulic fracturing and its application[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(03): 452-455.]
- [26] CAO H, ZHANG G, LI S, et al. Fracturing initiation and breakdown pressures in fracturing-flooding sandstone reservoirs [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024.
- [27] 张鑫, 刘泽功, 张健玉, 等. 深部高瓦斯煤层爆破致裂增透裂纹扩展规律研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(07): 89-100. [ZHANG X, LIU Z G, ZHANG J Y, et al. Study on propagation law of cracking and permeability enhancement caused by blasting in deep high-

- gas coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(07): 89–100.]
- [28] GUO Y, ZHAO Z, LYU Y, et al. The study of effect of cyclic variable loading fracturing on reactivation of natural fracture[C]// *Proceedings of the ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA, 2021: ARMA–2021–1725.
- [29] HE P, LU Z, LU Y, et al. Experimental study on fracture propagation and induced earthquake reduction by pulse hydraulic fracturing in shale reservoirs [J]. *Gas Science and Engineering*, 2023, 110: 204908.
- [30] 郑学林. 页岩超低温诱导裂缝机理研究 [D]; 中国石油大学(北京), 2023. [ZHANG X L. Study on the mechanism of cryogenic induced fractures in shale[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.]
- [31] CHANG X, XU E, GUO Y, et al. Experimental study of hydraulic fracture initiation and propagation in deep shale with different injection methods [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 216: 110834.
- [32] MOGHADDAM R H, GOLSHANI A. Experimental study on fracture propagation in anisotropy rock under cyclic hydraulic fracturing [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 295: 109775.
- [33] WEI C, LI S, YU L, et al. Study on mechanism of strength deterioration of rock-like specimen and fracture damage deterioration model under pulse hydraulic fracturing [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(7): 4959–4973.
- [34] WANG Y, ZHAI C, LIU T, et al. Experimental investigation of methane explosion fracturing in bedding shales: Load characteristics and three-dimensional fracture propagation [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 34(10): 1365–1383.
- [35] ZANG A, ZIMMERMANN G, HOFMANN H, et al. How to reduce fluid-injection-induced seismicity [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 475–493.
- [36] PATEL S, SONDERGELD C, RAI C. Laboratory studies of hydraulic fracturing by cyclic injection [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 95: 8–15.
- [37] WU X, GUO Y, CHANG X, et al. Experimental study on cyclic hydraulic fracturing of tight sandstone under in-situ stress [J]. *Processes*, 2023, 11(3): 875.
- [38] JIA Y, LU Z, XIONG Q, et al. Laboratory characterization of cyclic hydraulic fracturing for deep shale application in Southwest China [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 148: 104945.
- [39] XUE Y, LIU J, RANJITH P, et al. Changes in microstructure and mechanical properties of low-permeability coal induced by pulsating nitrogen fatigue fracturing tests [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(12): 7469–7488.
- [40] GUANHUA N, KAI D, SHANG L, et al. Gas desorption characteristics effected by the pulsating hydraulic fracturing in coal [J]. *Fuel*, 2019, 236: 190–200.
- [41] HUANG B, LI P. Experimental investigation on the basic law of the fracture spatial morphology for water pressure blasting in a drillhole under true triaxial stress [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48: 1699–1709.
- [42] HU S, PANG S, YAN Z. A new dynamic fracturing method: deflagration fracturing technology with carbon dioxide [J]. *International Journal of Fracture*, 2019, 220(1): 99–111.
- [43] 徐鹏, 程远方, 刘新云, 等. 低渗透油气藏爆炸压裂模拟试验及裂缝分形特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(05): 636–640. [XU P, CHENG Y F, LIU X Y, et al. Explosive fracturing simulation experiment for low permeability reservoirs and fractal characteristics of cracks produced by explosive fracturing[J]. *Petroleum Exploration And Development*, 2013, 40(05): 636–640.]
- [44] TARIQ Z, MAHMOUD M, ABDULRAHEEM A, et al. An experimental study to reduce the breakdown pressure of the unconventional carbonate rock by cyclic injection of thermochemical fluids [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 187: 106859.
- [45] TARIQ Z, MAHMOUD M, ABDULRAHEEM A, et al. An environment friendly approach to reduce the breakdown pressure of high strength unconventional rocks by cyclic hydraulic fracturing [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2020, 142(4): 043002.
- [46] KANG H, ZHANG J, FAN X, et al. Cyclic injection to enhance hydraulic fracturing efficiency: Insights from laboratory experiments [J]. *Geofluids*, 2020, 2020(1): 8844293.
- [47] 吴飞鹏, 贾涵, 任杨, 等. 可控复合脉冲爆燃压裂动态加载模型 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(03): 120–125. [WU F P, JIA H, REN Y, et al. Dynamic modeling of gas loading with controllable ignition of propellants for downhole blasting fracturing[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2015, 39(03): 120–125.]
- [48] ZANG A, STEPHANSSON O, STENBERG L, et al. Hydraulic fracture monitoring in hard rock at 410 m depth with an advanced fluid-injection protocol and extensive sensor array [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 208(2): 790–813.
- [49] ZANG A, ZIMMERMANN G, HOFMANN H, et al. Relaxation damage control via fatigue-hydraulic fracturing in granitic rock as inferred from laboratory-, mine-, and field-scale experiments [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 6780.
- [50] DIAZ M, JUNG S G, ZHUANG L, et al. Hydraulic, mechanical and seismic observations during hydraulic fracturing by cyclic injection on Pocheon granite[C]// *Proceedings of the ISRM International Symposium-Asian Rock Mechanics Symposium*, ISRM, 2018: ISRM-ARMS10–2018–2165.
- [51] DIAZ M, JUNG S, ZHUANG L, et al. Comparison of acoustic emission activity in conventional and cyclic hydraulic fracturing in cubic granite samples under tri-axial stress state[C]// *Proceedings of the ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA,

- 2018: ARMA-2018-1160.
- [52] ZIMMERMANN G, MOECK I, BLÖCHER G. Cyclic waterfrac stimulation to develop an enhanced geothermal system (EGS)—conceptual design and experimental results [J]. *Geothermics*, 2010, 39(1): 59–69.
- [53] 周再乐. 循环载荷条件下致密岩石的力学特性及应用 [D], 2019. [ZHOU Z L. The study of rock mechanical property under cyclic load and application[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.]
- [54] OLSON J E. Joint pattern development: Effects of subcritical crack growth and mechanical crack interaction [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B7): 12251–12265.
- [55] NARA Y, NAKABAYASHI R, MARUYAMA M, et al. Influences of electrolyte concentration on subcritical crack growth in sandstone in water [J]. *Engineering Geology*, 2014, 179: 41–49.
- [56] ATKINSON B K. Subcritical crack growth in geological materials [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B6): 4077–4114.
- [57] NIEMZ P, CESCA S, HEIMANN S, et al. Full-waveform-based characterization of acoustic emission activity in a mine-scale experiment: a comparison of conventional and advanced hydraulic fracturing schemes [J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 222(1): 189–206.
- [58] HEAP M, VINCIGUERRA S, MEREDITH P. The evolution of elastic moduli with increasing crack damage during cyclic stressing of a basalt from Mt. Etna volcano [J]. *Tectonophysics*, 2009, 471(1–2): 153–160.
- [59] BROWNING J, MEREDITH P G, STUART C, et al. A directional crack damage memory effect in sandstone under true triaxial loading [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(14): 6878–6886.
- [60] 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: 495–515.
- [61] YU X, CHEN A, HONG L, et al. Experimental investigation of the effects of long-period cyclic pulse loading of pulsating hydraulic fracturing on coal damage [J]. *Fuel*, 2024, 358: 129907.
- [62] JINGNA X, JUN X, GUANHUA N, et al. Effects of pulse wave on the variation of coal pore structure in pulsating hydraulic fracturing process of coal seam [J]. *Fuel*, 2020, 264: 116906.
- [63] ZHUANG L, ZANG A. Laboratory hydraulic fracturing experiments on crystalline rock for geothermal purposes [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216: 103580.
- [64] SHI X, XU H, HAN L, et al. Application of pulse hydraulic fracturing for tight oil reservoir with low frequency[C]// *Proceedings of the SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, OnePetro*, 2023.
- [65] 吴飞鹏, 赵志强, 薛海洁, 等. 甲烷燃爆压裂冲击下页岩动态破裂响应规律实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4284–4296. [WU F P, ZHAO Z Q, XUE H J, et al. Experimental study on the dynamic fracture response law of shale under the impact of methane combustion fracturing[J]. *Journal Of China Coal Society*, 2023, 48(12): 4284–4296.]
- [66] LIU Y, XU T, YUAN Y, et al. A laboratory study on fracture initiation and propagation of granite under cyclic-injection hydraulic fracturing [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 212: 110278.
- [67] XU Q, YU Y, LIU R, et al. Study on dynamic damage characteristics of coal under alternating hydraulic pressure [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80: 2385–2397.
- [68] HU Z, XU T, MOORE J, et al. Investigation of the effect of different injection schemes on fracture network patterns in hot dry rocks-A numerical case study of the FORGE EGS site in Utah [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 97: 104346.
- [69] WEI C, ZHANG B, LI S, et al. Interaction between hydraulic fracture and pre-existing fracture under pulse hydraulic fracturing [J]. *SPE Production & Operations*, 2021, 36(03): 553–571.
- [70] ERARSLAN N, WILLIAMS D. The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 56: 15–26.
- [71] COSTIN L, HOLCOMB D. Time-dependent failure of rock under cyclic loading [J]. *Tectonophysics*, 1981, 79(3–4): 279–296.
- [72] ATKINSON B K, MEREDITH P G. *Fracture mechanics of rock* [M]. London: Academic Press, 1987: 477–519.
- [73] ATKINSON B K. Subcritical crack propagation in rocks: Theory, experimental results and applications [J]. *Journal of Structural Geology*, 1982, 4(1): 41–56.
- [74] 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.
- [75] CRANE F A A, CHARLES J A, FURNESS J. *Selection and use of engineering materials* [M]. Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 1997: 101–117.
- [76] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1963, 85(4): 528–533.
- [77] BALUCH M, QURESHY A, AZAD A. Fatigue crack propagation in plain concrete[C]// *Proceedings of the Fracture of Concrete and Rock: SEM-RILEM International Conference June 17–19, 1987, Houston, Texas, USA, Springer*, 1989: 80–87.

- [78] BAZANT Z P, XU K. Size effect in fatigue fracture of concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 1991, 88(4): 390–399.
- [79] BAZANT Z P, SCHELL W F. Fatigue fracture of high-strength concrete and size effect [J]. *ACI Materials Journal*, 1993, 90: 472–472.
- [80] SAIN T, KISHEN J C. Probabilistic assessment of fatigue crack growth in concrete [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(12): 2156–2164.
- [81] SAIN T, KISHEN J C. Prediction of fatigue strength in plain and reinforced concrete beams [J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104(5): 621.
- [82] KIM J, KIM Y. Fatigue crack growth of high-strength concrete in wedge-splitting test [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(5): 705–712.
- [83] BRAKE N A, CHATTI K. Equivalent crack, fracture size effect, and cohesive stress zone of plain concrete under quasi-static and variable high-cycle fatigue loading [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(4): 04016247.
- [84] BRAKE N A, CHATTI K. Prediction of size effect and non-linear crack growth in plain concrete under fatigue loading [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 109: 169–185.
- [85] BRAKE N A, CHATTI K. Prediction of transient and steady-state flexural fatigue crack propagation in concrete using a cyclic R-curve [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, 138(4): 371–378.
- [86] SAKHAE-POUR A, AGRAWAL A. Predicting breakdown pressure and breakdown cycle in cyclic fracturing [J]. *SPE Production & Operations*, 2018, 33(04): 761–769.
- [87] AGRAWAL A, SAKHAE-POUR A. Effects of cyclic fracturing on acoustic events and breakdown pressure[C]// *Proceedings of the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, URTEC*, 2017: URTEC–2669677–MS.
- [88] XING Y, ZHANG G, WAN B, et al. Subcritical fracturing of sandstone characterized by the acoustic emission energy [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 2459–2469.
- [89] XING Y, ZHANG G, LIN Q, et al. Subcritical fracture process of sandstone with AE energy analysis[C]// *Proceedings of the ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA*, 2017: ARMA–2017–0938.
- [90] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47: 267–274.
- [91] YANG B, MALL S, RAVI-CHANDAR K. A cohesive zone model for fatigue crack growth in quasibrittle materials [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38(22–23): 3927–3944.
- [92] KHORAMISHAD H, CROCOMBE A, KATNAM K, et al. Fatigue damage modelling of adhesively bonded joints under variable amplitude loading using a cohesive zone model [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(18): 3212–3225.
- [93] NOJAVAN S, SCHESSER D, YANG Q. An in situ fatigue-CZM for unified crack initiation and propagation in composites under cyclic loading [J]. *Composite Structures*, 2016, 146: 34–49.
- [94] XI X, YANG S. A non-linear cohesive zone model for low-cycle fatigue of quasi-brittle materials [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 122: 103641.
- [95] CHARLES R. Static fatigue of glass. II [J]. *Journal of Applied Physics*, 1958, 29(11): 1554–1560.
- [96] BRANTUT N, HEAP M, MEREDITH P, et al. Time-dependent cracking and brittle creep in crustal rocks: A review [J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 52: 17–43.
- [97] NARA Y, YAMANAKA H, OE Y, et al. Influence of temperature and water on subcritical crack growth parameters and long-term strength for igneous rocks [J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 193(1): 47–60.
- [98] NARA Y, KASHIWAYA K, NISHIDA Y, et al. Influence of surrounding environment on subcritical crack growth in marble [J]. *Tectonophysics*, 2017, 706: 116–128.
- [99] HAO R, LI J, CAO P, et al. Test of subcritical crack growth and fracture toughness under water-rock interaction in three types of rocks [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(2): 662–668.
- [100] WIEDERHORN S, BOLZ L. Stress corrosion and static fatigue of glass [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1970, 53(10): 543–548.
- [101] FAVREAU R. Displacement velocity of rock by step blasting[C]// *Proceedings of the Proceedings of the First International Conference on Rock Blasting*, 1983.
- [102] MCHUGH S L, KEOUGH D. Fracture and permeability enhancement with pulse tailoring[C]// *Proceedings of the SPE Unconventional Resources Conference/Gas Technology Symposium, SPE*, 1982: SPE–10844–MS.
- [103] KUSZMAUL J S. A new constitutive model for fragmentation of rock under dynamic loading [C]// *Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Columbia, USA*, 1987: 412–423.
- [104] 卢文波, 陶振宇. 爆生气体驱动的裂纹扩展速度研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1994, (03): 264–268. [LU W B, TAO Z Y. Study on fracture growth rate driven by explosion gas[J]. *Explosion And Shock Waves*, 1994, (03): 264–268.]
- [105] PAINE A, PLEASE C. An improved model of fracture propagation by gas during rock blasting—some analytical results[C]// *Proceed-*

- ings of the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Elsevier, 1994: 699–706.
- [106] 李海涛, 罗伟, 姜雨省, 等. 复合射孔爆燃气体压裂裂缝起裂扩展研究 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(03): 307–314. [LI H T, LUO W, JIANG Y S, et al. Initiation and extension of gas-driven fracture during compound perforation[J] Explosion And Shock Waves, 2014, 34(03): 307–314.]
- [107] 蒲春生, 任山, 吴飞鹏, 等. 气井高能气体压裂裂缝系统动力学模型研究 [J]. 武汉工业学院学报, 2009, 28(03): 12–17. [PU C S, REN S, WU F P, et al. The study on fracture system dynamics models of HEGF in gas wells[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2009, 28(03): 12–17.]
- [108] 吴飞鹏, 蒲春生, 陈德春, 等. 多级脉冲爆燃压裂作用过程耦合模拟 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(05): 605–611. [WU F P, PU C S, CHEN D C, et al. Coupling simulation of multistage pulse conflagration compression fracturing[J]. Petroleum Exploration And Development, 2014, 41(05): 605–611.]
- [109] 郭旭升, 胡宗全, 李双建, 等. 深层—超深层天然气勘探研究进展与展望 [J]. 石油科学通报, 2023, 8(04): 461–474. [GUO X S, HU Z Q, LI S J, et al. Progress and prospect of natural gas exploration and research in deep and ultra-deep strata[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(04): 461–474.]

(编辑 马桂霞)

第一作者: 孙伟 (1995年—), 博士研究生, 主要从事石油工程岩石力学方面的研究, swgt2018@163.com。

通讯作者: 张广清 (1975年—), 博士, 教授, 主要从事石油工程岩石力学方面的研究, zhangguangqing@cup.edu.cn。