

液氮循环压裂裂缝起裂与形态特征可视化研究

洪纯阳, 杨睿月*, 黄中伟, 温海涛, 夏志浩, 李根生

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, yangruiyue@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-03-017

国家自然科学基金青年项目“干热岩低温循环压裂造缝机理研究”(52004299)和国家自然科学基金重大科研仪器研制项目“水力喷射径向水平井综合实验系统”(51827804)联合资助

摘要 针对干热岩储层改造存在的起裂压力高、裂缝单一和易诱发地震的瓶颈难题, 本文结合循环水力压裂和液氮压裂技术优势, 探索了一种液氮循环压裂开发干热岩的新思路, 即通过“注入—停顿”的方式周期性注入低温液氮, 使岩石在交变热应力—流体压力耦合作用下发生疲劳损伤, 促进裂缝起裂、转向、分叉进而形成复杂缝网, 提高储层改造体积。目前, 液氮压裂技术的研究多集中在液氮单次或循环冷却致裂岩石力学机制和液氮压裂造缝机理方面, 考虑地应力条件下的液氮循环压裂造缝机理方面的研究未见报道。为了验证液氮循环压裂开发干热岩的可行性, 基于自主研发的真三轴液氮循环压裂实验装置, 采用可视化材料PMMA(Polymethyl Methacrylate), 研究了水平应力差异系数和循环次数的影响规律, 揭示了液氮循环压裂裂缝起裂与形态特征, 并与清水循环压裂进行了对比。结果表明: 在较低的循环次数和循环压力下, 液氮循环压裂相对于清水循环压裂可显著降低起裂压力(下降47.1%~71.7%), 在交变热应力—流体压力耦合作用下液氮循环压裂易形成以“热应力裂缝+主裂缝”为特征的复杂缝网; 液氮循环压裂不易受水平应力差异系数控制, 在较大水平应力差异系数下仍能取得较好的造缝效果; 液氮循环冷却预处理是液氮循环压裂的关键, 增大液氮循环冷却次数可显著降低裂缝起裂压力并形成复杂缝网, 当直接采用高压液氮压裂时, 起裂压力甚至会超过清水压裂; 总体来看, 液氮循环压裂相对于清水循环压裂能以较低的循环次数和循环注入压力实现较好的造缝效果, 有望为干热岩绿色经济高效开发提供新途径。研究结果可望为液氮循环压裂开发干热岩提供理论依据和实验基础。

关键词 增强型地热系统(EGS); PMMA; 液氮循环压裂; 热应力; 疲劳损伤

Visualization of fracture initiation and morphology by cyclic liquid nitrogen fracturing

HONG Chunyang, YANG Ruiyue, HUANG Zhongwei, WEN Haitao, XIA Zhihao, LI Gensheng

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

Abstract Conventional hydraulic fracturing generally produces high breakdown pressure, results only in single major fracture morphology and increases the risk of seismic events during the stimulation of dry hot rock (HDR) reservoirs. Aiming at addressing the above bottlenecks during hydraulic fracturing, a new reservoir stimulation method, known as cyclic liquid nitrogen (LN₂) fracturing, based on cyclic soft stimulation (CSS) and LN₂ fracturing was explored in this paper. In cyclic LN₂ fracturing,

引用格式: 洪纯阳, 杨睿月, 黄中伟, 温海涛, 夏志浩, 李根生. 液氮循环压裂裂缝起裂与形态特征可视化研究. 石油科学通报, 2023, 01: 87-101
HONG Chunyang, YANG Ruiyue, HUANG Zhongwei, WEN Haitao, XIA Zhihao, LI Gensheng. Visualization of fracture initiation and morphology by cyclic liquid nitrogen fracturing. Petroleum Science Bulletin, 2023, 01: 87-101. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.01.006

low-temperature LN₂ was injected in a cyclic manner, i.e. alternating high-injection-rate and low-injection-rate (or stop injection). Hence, formation rocks would be subjected to fatigue damage under the combined action of alternating thermal stress and fluid pressure, which was expected to promote fracture initiation, propagation and bifurcation to form complex fracture networks and improve the stimulated reservoir volume. However, the research on LN₂ fracturing was mainly focused on the mechanisms of cyclic or single cooling treatment on rock and the fracturing performance of LN₂ fracturing. No works on the cyclic LN₂ fracturing performance, especially subjected to in-situ stresses were published as far as we know. To verify the feasibility of developing HDR by cyclic LN₂ fracturing, the fracture initiation and morphology of cyclic LN₂ fracturing were revealed by using Polymethyl Methacrylate (PMMA) based on the self-developed true-triaxial experiment of cyclic LN₂ fracturing. The effects of horizontal stress difference ratio and the number of cycles on cyclic LN₂ fracturing performance were studied. Cyclic water fracturing experiments were also conducted as a comparison. The results show that cyclic LN₂ fracturing can significantly reduce the breakdown pressure, with 47.1%~71.7% lower than cyclic water fracturing. Under the combined action of alternating thermal stress and fluid pressure, cyclic LN₂ fracturing tends to form a complex fracture network characterized by “thermally-induced fractures + major fractures”. The fracture initiation and morphology of cyclic LN₂ fracturing are not easily affected by the horizontal stress difference ratio. Complex fracture networks can still be produced by the cyclic LN₂ fracturing under a larger horizontal stress difference ratio. Increasing the number of cycles can reduce more breakdown pressure and generate more pronounced complex fracture networks. When high-pressure LN₂ was injected into the wellbore, the breakdown pressure was even higher than that of water fracturing, which indicated that cyclic LN₂ cooling pretreatment was the key to enhancing the LN₂ fracturing performance. In general, cyclic LN₂ fracturing can achieve better fracturing performance with a relatively lower number of cycles and cyclic pretreat pressure compared with cyclic water fracturing. Cyclic LN₂ fracturing was expected to provide a new way for the green, economic and efficient development of HDR. The results were expected to provide a theoretical and experimental basis for the development of HDR by using cyclic LN₂ fracturing.

Keywords Enhanced Geothermal System (EGS); PMMA; cyclic liquid nitrogen fracturing; thermal stress; fatigue damage

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.01.006

0 引言

增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems, EGS)是目前公认的干热岩开发技术^[1-3]。EGS系统通常由注入井、生产井和裂缝网络组成^[4]。为实现干热岩的高效经济开采,需通过储层改造技术提高渗透率、沟通注采井,以创造高效的取热通道。但是,要建成安全、经济、高效的EGS工程并非易事。干热岩埋深超过3 km,温度在180~650 °C之间,高温高压的极端环境导致油气行业传统水力压裂技术不能直接应用于干热岩压裂中,对压裂液的选择提出了新的挑战。干热岩储层渗透率极低(0.001~0.1 mD),通常是坚硬的变质岩或花岗岩^[5],且具有高应力、高应力差、高闭合压力等特点。一方面导致岩石起裂压力高(韩国Pohang项目对4100 m干热岩储层进行水力压裂,起裂压力高达100 MPa^[6]),另一方面水力裂缝受地应力控制程度高,易形成单一主裂缝^[7],不易形成复杂缝网,连通效果差。例如美国Fenton Hill项目在三个阶段的储层改造工作中,水力裂缝未形成有效沟通注采井,最终经历8次钻井、5次压裂才成功发电^[8];美国FORGE项目对58-32井不同深度的干热岩储层进行压裂,但未形成体积缝网^[9]。此外,传统的“刚性造储”可能诱发地震,不利于EGS安全高效开

发。2006年瑞士的巴塞尔干热岩试验项目因诱发地震而被迫关停,2017年11月韩国的Pohang干热岩项目发生了M_w 5.5地震^[10]。因此,如何采用“柔性造储”的方式有效沟通注入井和生产井,避免纯粹靠提高压力改造储层是构建EGS系统的瓶颈,也是干热岩开发面临的重大难题与需求。

国内外专家学者借鉴岩石承受循环交变的机械载荷时易发生疲劳破坏造成强度降低、产生晶间裂缝的思路,提出了循环水力压裂或循环软压裂(Cyclic Soft Stimulation, CSS),也称为疲劳水力压裂(Fatigue Hydraulic Fracturing, FHF)^[11-15]。该技术采用高一低排量循环交替泵注的方式,使储层岩石在水压循环载荷的作用下发生疲劳破坏,进而导致储层岩石强度局部降低。前人针对循环水力压裂机理进行了一系列的研究工作,结果表明:循环水力压裂可有效降低裂缝起裂压力,可促进裂缝分叉、转向进而形成复杂缝网,裂缝导流能力相对于水力压裂可提升3~10倍^[16-17]。同时,还有望降低EGS储层改造诱发地震风险^[18]。

近年来,采用液氮作为钻井和压裂流体成为地热开发研究中的热点。研究表明,液氮压裂干热岩主要有以下技术优势^[19-23]:(1)液氮具有超低温特性(大气压下可达-196°C),与高温干热岩接触后可产生强烈热冲击,可降低起裂压力,诱导主裂缝转向并在主裂

缝周围形成大量热应力裂缝，可形成水力裂缝—热应力裂缝—天然裂缝的复杂裂缝网络；(2)液氮受热易膨胀，有利于裂缝延伸和压裂液的返排；(3)液氮黏度低，易激活天然裂缝；(4)不会造成水敏、水锁等储层伤害。此外，液氮循环冷却处理后，岩样的抗拉强度、抗压强度、杨氏模量、断裂韧性进一步下降，孔隙度和渗透率显著提升，对降低起裂压力和形成复杂缝网有重要作用^[24-25]。

本文探索的液氮循环压裂干热岩储层新方法结合了循环水力压裂和液氮压裂技术优势，采用“注入—停顿”的方式周期性注入液氮，使储层岩石在交变热应力—流体压力耦合作用下发生疲劳损伤，有望进一步提升储层改造效果，提高EGS系统取热效率。但目前液氮压裂技术的研究多集中在液氮单次或循环冷却致裂岩石力学机制和液氮压裂造缝机理方面，液氮循环压裂复杂缝网形成机理方面的研究未见报道。为了探究液氮循环压裂的可行性，直观的展示液氮循环压裂的造缝效果，本文采用透明高分子材料PMMA (Polymethyl Methacrylate)作为试样进行压裂实验。基于自主研发的真三轴液氮循环压裂实验装置，研究了液氮循环压裂裂缝起裂与形态特征，并与清水压裂进行了对比，揭示了液氮循环压裂造缝机理与技术优势，探索了液氮循环压裂开发干热岩的可行性。研究结果可望为液氮循环压裂开发干热岩提供理论依据和实验基础。

1 实验设备及方法

1.1 试样制备

图1所示为PMMA试样制备与液氮循环冷却方法示意图。实验所用PMMA试样如图1a所示，尺寸均为 $100 \times 100 \times 100$ mm，在试样中部钻孔以模拟井眼，钻孔直径为16 mm，钻孔长度为60 mm。采用植筋胶将直径为14 mm、长度40 mm不锈钢井筒固定在钻孔中间，并预留长度为20 mm的裸眼段。采用如图1b所示方法对施加三轴应力下的PMMA试样进行液氮循环冷却处理。液氮从内管进入试样，受热气化后从环空排出，以实现试样的高效冷却损伤。此外，预设裸眼段的热电偶可实时监测压裂过程中的温度变化，具体实验方法和实验流程见下文1.3实验方案部分。PMMA和不同类型花岗岩力学性质对比见表1(PMMA试样较为致密，未能采用气测法测得渗透率参数)，可以发现，PMMA试样的密度、杨氏模量、渗透率、孔隙度等参数与花岗岩差异较大，单轴抗拉、抗压强度和泊松比差异较小。但是，由于PMMA材料均质透明，且具有与岩石材料类似的脆性特征^[26]，采用PMMA材料可直观的展示不同实验条件下的裂缝形态特征，清晰的呈现热应力裂缝的分布规律，对揭示液氮循环压裂造缝机理有重要作用。因此，PMMA材料常被用于开展室内压裂实验研究，对比分析不同实验参数下的裂缝形态特征与裂缝动态扩展规律^[27-28]。当

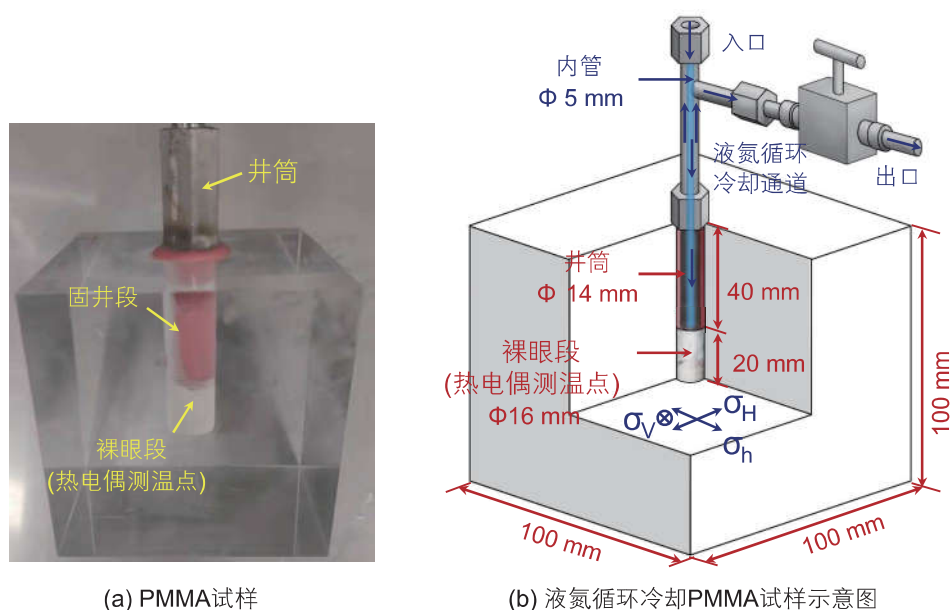


图1 PMMA试样制备与液氮循环冷却方法示意图

Fig. 1 PMMA specimen and schematic diagram of cyclic LN₂ cooling treatment on PMMA samples

然, 常温PMMA试样并不能完全替代高温花岗岩, 其裂缝起裂与形态特征仍存在较大差异, 因此, 我们将在后面的工作中直接采用高温花岗岩开展真三轴压裂实验, 并采用CT扫描等方法定量表征裂缝参数(裂缝宽度、迂曲度、体积等), 揭示液氮循环压裂干热岩造缝机理。

为了同时呈现六个面的裂缝形态特征, 采用如图2所示方法将压裂后的PMMA试样三维表面裂缝形态展开为二维形式。

1.2 实验设备

图3所示为真三轴液氮/清水循环压裂实验装置, 主要包括真三轴应力加载与加热系统、高压液氮注入系统、数据采集与控制系统3个部分, 可开展液氮循环压裂和清水循环压裂实验研究。真三轴应力加载与加热系统釜体采用外圆内方结构(图3a), 可容纳的最大试样尺寸为 $400 \times 400 \times 400$ mm, 可根据实验需要添加不同尺寸的压板, 以实现不同尺寸试样三轴应力的加载。该系统最大可施加油压为50 MPa, 控制精度为0.1 MPa。在压板中还设计有一套加热系统实现岩石加热与保温, 以模拟地层温度条件, 加热系统最大功

率为14.4 kW, 配合热电偶可实现内部温度的实时调控。清水注入系统采用注入泵恒速或恒压注入压裂液(图3b)。在恒速模式下以恒定排量泵注压裂液; 在恒压模式下, 则先以设定排量泵注压裂液, 当注入压力到达设定值后停止泵注, 当注入压力低于设定值时以设定排量泵注补液并维持压力恒定在设定值。清水注入系统最大注入压力100 MPa, 控制精度为0.1 MPa, 最大注入排量可达100 mL/min, 最大单次注入量为800 mL, 控制精度为0.1 mL。考虑到液氮的超低温特性, 常规注入泵很难满足实验要求, 为实验带来活塞隔热差易冻结、液氮添加困难、密封元件受冷失效等诸多问题。因此, 本实验装置中的高压液氮注入系统采用高压氮气驱动高压液氮罐中的液氮注入试样, 通过减压阀调节高压气体出口压力从而控制液氮注入压力。这种采用高压氮气驱动液氮进行压裂的实验方法为本研究团队首次提出, 是采用液氮作为压裂液进行室内真三轴液氮低温压裂实验的关键技术。高压液氮注入系统主要包括自增压液氮罐、高压液氮罐、气体增压泵和空气压缩机(图3c)。自增压液氮罐主要用于为高压液氮罐提供液氮, 容量为175 L, 最大耐压4 MPa。高压液氮罐容量为5 L, 最大耐压30 MPa,

表1 PMMA和不同类型花岗岩力学性质对比

Table 1 Comparison of basic geomechanical properties between PMMA and different types of granites

物性参数	PMMA	五莲花 ^[21]	珍珠花 ^[21]	鲁灰 ^[29]
密度/(kg/m ³)	1170	2690	2650	2630
单轴抗压强度/MPa	90.00	150.00	137.00	121.97
抗拉强度/MPa	14.34	11.48	7.10	10.02
杨氏模量/GPa	2.56	46.00	38.00	39.41
泊松比	0.41	0.25	0.21	0.28
孔隙度/%	—	0.39	0.55	0.45
渗透率/md	—	6.57×10^{-3}	11.29×10^{-3}	11.60×10^{-3}

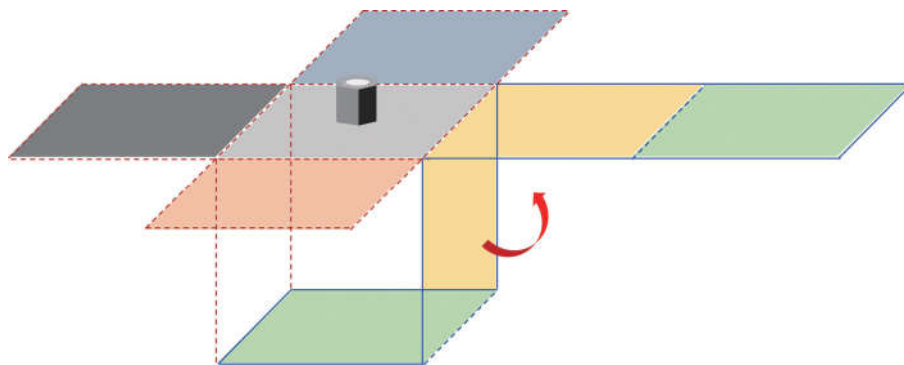


图2 压裂后试样裂缝形态二维展开方法

Fig. 2 Unfolded 3D graphics and fold-out diagram of a sample

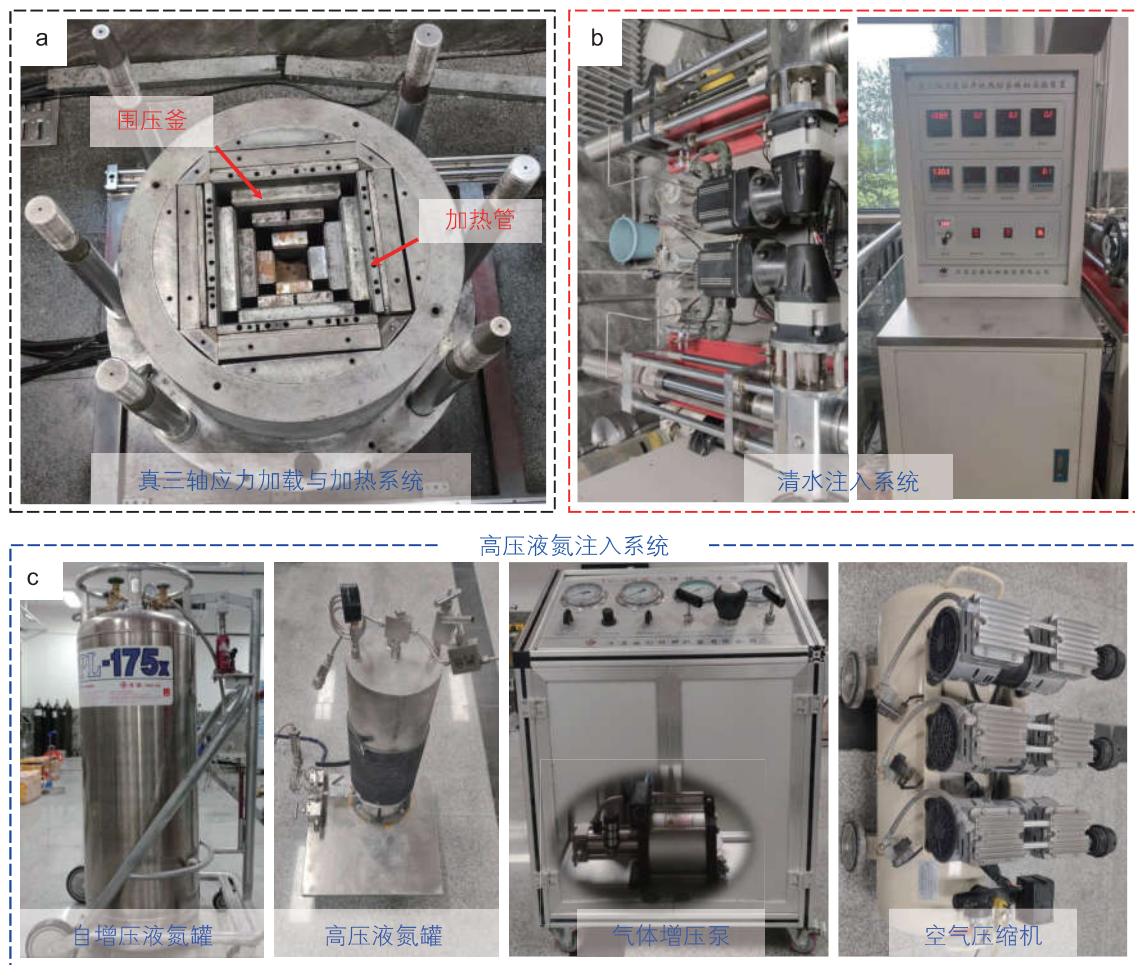


图 3 真三轴液氮/清水循环压裂实验装置: (a) 真三轴应力加载与加热系统; (b) 清水注入系统; (c) 高压液氮注入系统

Fig. 3 True-triaxial fracturing equipment. (a) true triaxial-loading and heating system; (b) water injection system; (c) high-pressure LN₂ injection system

在罐体出口配备有高精度压力传感器,可实时监测注入压力变化。空气压缩机用于为气体增压泵提供动力,配合气体增压泵将来自氮气瓶的低压氮气(0~15 MPa),增压至 30~45 MPa,从而将高压液氮罐中的液氮注入试样完成压裂实验。数据采集与控制系统的主要功能为:通过配套软件,设置三轴应力、加热温度、压裂液注入速率等关键参数,实时监测压裂过程中的注入压力、三轴应力、裸眼段温度等参数随时间的变化规律,并通过数据采集卡实时记录、保存实验数据。

1.3 实验流程

基于上述实验系统,绘制如图 4 所示的真三轴液氮循环压裂实验装置示意图,液氮循环压裂实验的主要流程可以归结为:

(1) 试样加载。将试样放入围压釜并按实验计划施加三轴应力;

(2) 试样冷却。开启自增压液氮罐出口阀,通过耐

低温管线以设定压力向试样注入液氮,低温液氮从内管进入冷却试样,受热气化形成的氮气从环空排出,以实现试样的高效冷却损伤;

(3) 静置回温。将试样从围压釜中取出,静置 6 h,待完全恢复室温后即完成第一个循环;

(4) 循环冷却。重复步骤(1)(2)(3)使循环次数达到设定值后开始准备压裂;

(5) 氮气加压。以空气压缩机为动力源,配合气体增压泵将常规氮气瓶中的低压氮气(0~15 MPa)增压至 30~45 MPa并储层在高压氮气罐中;

(6) 灌满液氮。利用自增压液氮罐将高压液氮罐灌满液氮;

(7) 试样预冷。重复步骤(2),冷却管线和试样并泄压,确保在高压液氮注入井底时处于低温状态,此即为最后一次循环;

(8) 启动压裂。关闭井筒环空出口阀,通过减压阀控制高压氮气储集罐出口压力,进而控制液氮注入速

度，对试样进行压裂；

(9)采集数据。实时采集液氮循环冷却及压裂过程中的温度、压力等实验数据。

1.4 实验方案

实验方案如表 2 所示，共进行实验 14 组，主要

研究水平应力差异系数和循环次数对液氮循环压裂的影响规律，并与清水循环压裂进行对比。中国共和盆地地应力实测数据表明，干热岩储层水平应力差异系数 $((\sigma_H - \sigma_h) / \sigma_h)$ 多为 0.1~0.4^[30]。因此，在本文中，基础案例的水平应力差异系数设置为 0.4 $(\sigma_H / \sigma_h / \sigma_V = 10/7/15 \text{ MPa})$ 。PMMA 试样的起始温度均为 25 °C。

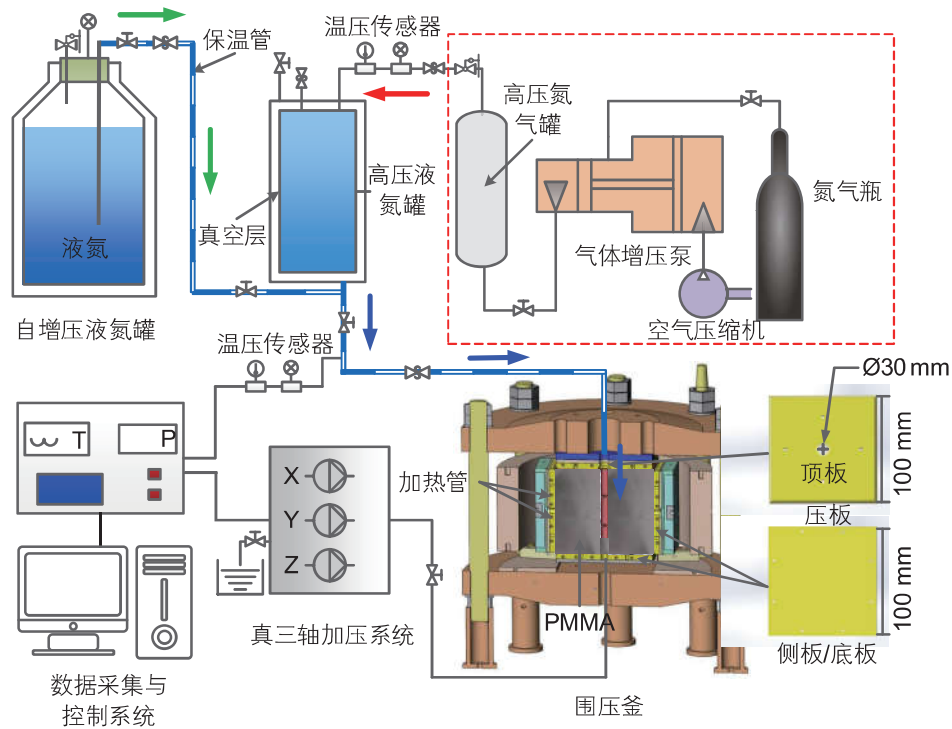


图 4 真三轴液氮循环压裂实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of the true-triaxial equipment of cyclic LN₂ fracturing

表 2 液氮与清水循环压裂 PMMA 实验方案

Table 2 Experimental matrix for cyclic LN₂/water fracturing on PMMA samples

编号	压裂液	σ_H/MPa	σ_h/MPa	σ_V/MPa	水平应力差异系数*	循环次数
LN 1	液氮	10.0	10.0	15.0	0	1
LN 2	液氮	10.0	8.5	15.0	0.2	1
LN 3	液氮	10.0	7.0	15.0	0.4	1
LN 4	液氮	10.0	5.5	15.0	0.8	1
LN 5	液氮	10.0	7.0	15.0	0.4	0
LN 6	液氮	10.0	7.0	15.0	0.4	3
LN 7	液氮	10.0	7.0	15.0	0.4	5
W 1	清水	10.0	10.0	15.0	0	1
W 2	清水	10.0	8.5	15.0	0.2	1
W 3	清水	10.0	7.0	15.0	0.4	1
W 4	清水	10.0	5.5	15.0	0.8	1
W 5	清水	10.0	7.0	15.0	0.4	0
W 6	清水	10.0	7.0	15.0	0.4	3
W 7	清水	10.0	7.0	15.0	0.4	5

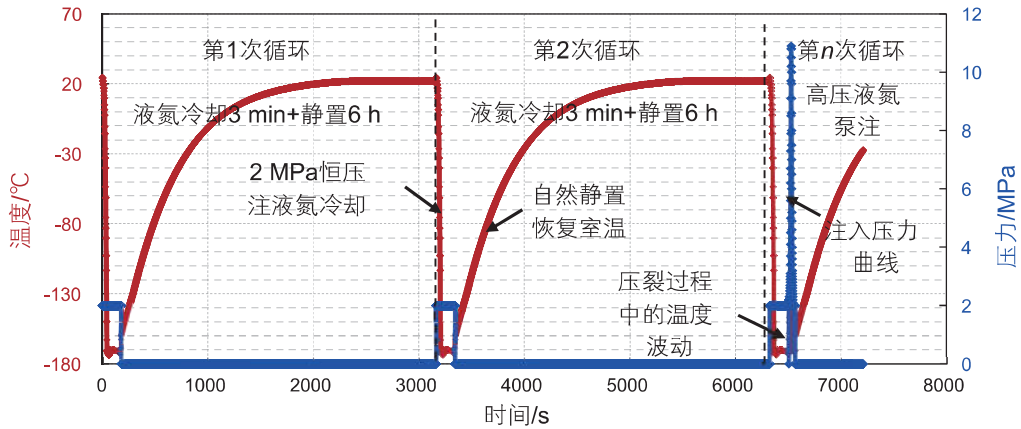
注: σ_H =最大水平主应力; σ_h =最小水平主应力; σ_V =垂向应力; 水平应力差异系数= $(\sigma_H - \sigma_h) / \sigma_h$

循环注入压力恒定为 2 MPa，循环冷却 3 min 后取出试样，并在室温条件下静置 6 h 待试样完全恢复室温。高压流体泵注压裂过程中，液氮循环压裂平均增压速率为 0.38 MPa/s，清水循环压裂注入速率恒定为 30 mL/min，平均增压速率为 0.41 MPa/s，平均增压速率较为接近。

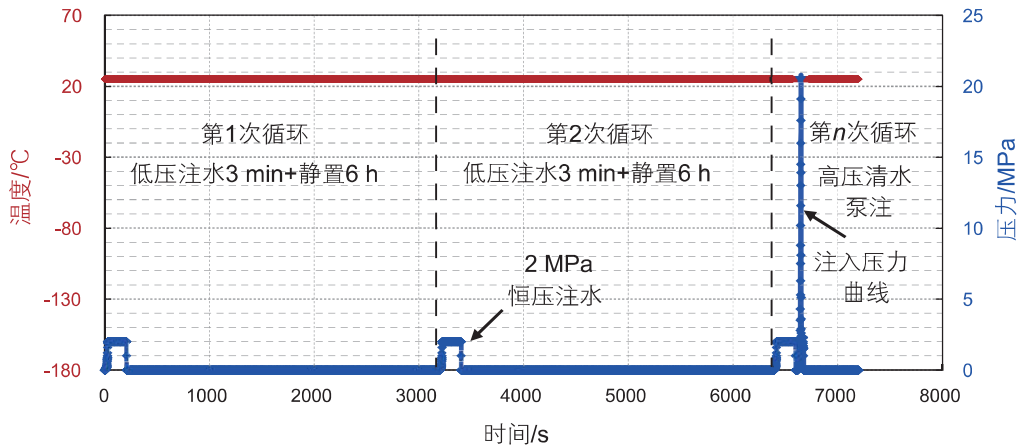
2 实验结果与分析

2.1 井底温度—压力交变规律分析

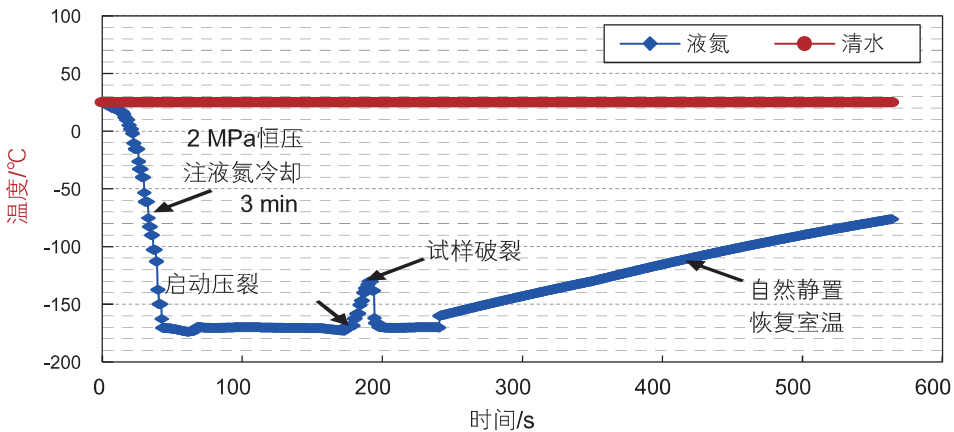
液氮循环压裂过程中的温度—压力交变规律如图 5a 所示。可以发现，在 2 MPa 恒压注液氮循环冷却过



(a) 液氮循环压裂过程中温度—压力交变曲线



(b) 清水循环压裂过程中温度—压力交变曲线



(c) 高压液氮与清水注入压裂过程温度对比

图 5 液氮与清水循环压裂过程中的温度—压力交变规律

Fig. 5 Temperature-pressure alternation curves during cyclic LN₂ and water fracturing

程中,井底温度迅速降低至 $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右并维持稳定,温度降低速率约为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。热流密度峰值是衡量总体传热强度的重要指标,采用这种液氮循环冷却方式相对于液氮循环浸泡可有效提升热流密度峰值,显著增强试样冷却效率,有利于在井筒周围试样中形成强烈热损伤^[31]。冷却3 min后,将试样在室温条件下静置,约50 min后井底温度恢复至室温(图中仅展示井底温度恢复室温过程,实际静置时间为6 h)。在第 n 次注液氮冷却后,泵注高压液氮对试样进行压裂。清水循环压裂过程中的温度—压力交变规律如图5b所示。为了与液氮循环压裂压力条件保持一致,采用2 MPa恒压注入,即先以30 mL/min泵注清水,当注入压力到达2 MPa后停止泵注。当注入压力低于2 MPa时以30 mL/min泵注补液并维持压力恒定在2 MPa。在第 n 次2 MPa恒压泵注清水后,以30 mL/min恒定排量泵

注高压清水对试样进行压裂。液氮与清水注入压裂过程温度对比如图5c所示,在本实验中,清水压裂温度始终维持在室温条件;液氮循环冷却3 min后注入高压液氮进行压裂,井底温度先上升后下降,发生约 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度波动。其主要原因在于高压液氮经管线和井筒注入井底与试样接触后发生换热,温度有所上升,且无法从井筒环空出口阀排出(图1b),井底温度有所上升;当试样出现裂缝后,高温氮迅速从裂缝逸出,低温氮直接进入井底与试样接触,使试样发生短暂的温度交变。

2.2 注入压力曲线分析

不同应力差异系数下液氮与清水循环压裂注入压力曲线如图6所示。可以发现液氮循环压裂和清水循环压裂注入压力曲线存在差异。一是液氮循环压裂注

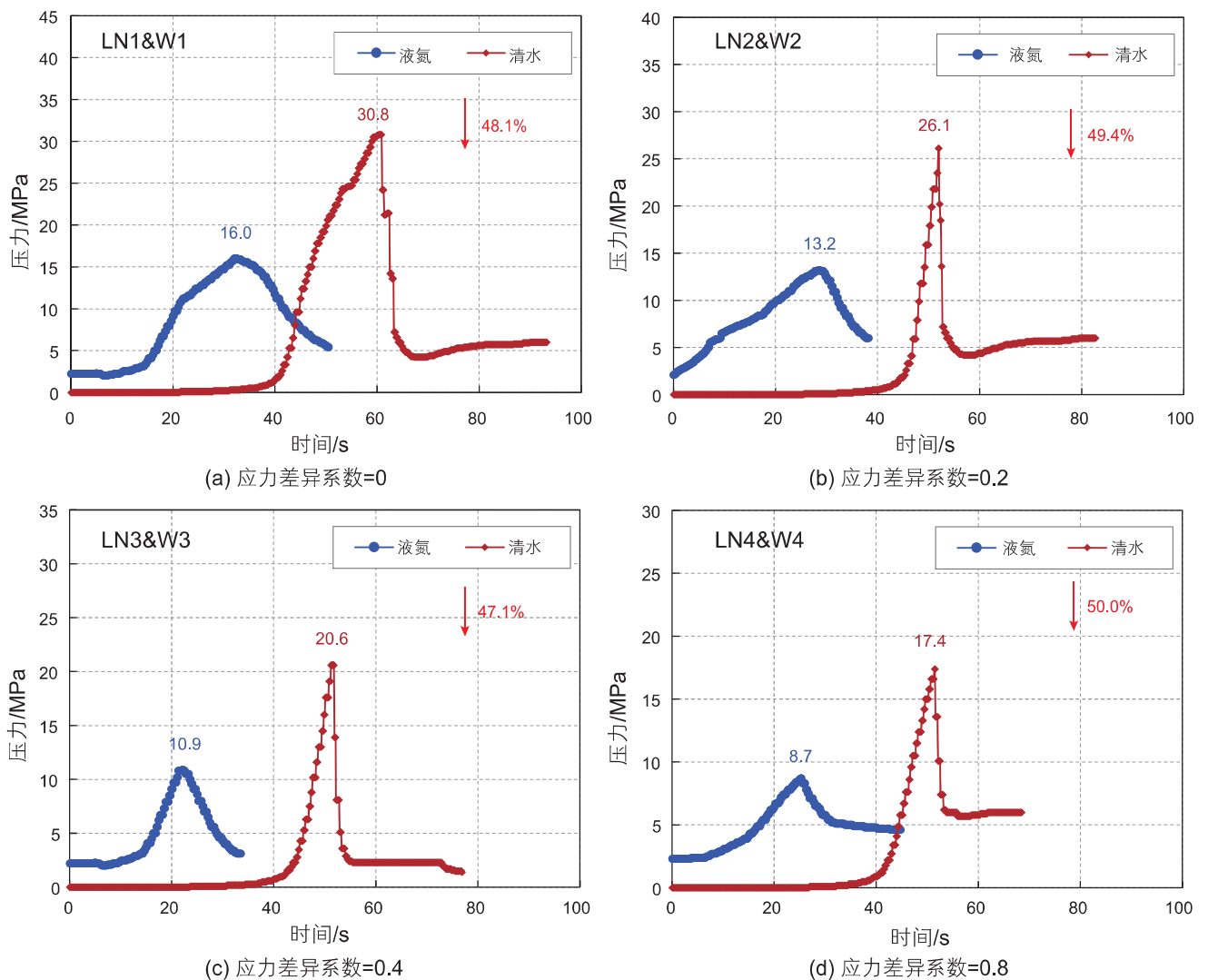


图6 不同应力差异系数下液氮与清水循环压裂注入压力曲线

Fig. 6 Pressure-time curves of the cyclic LN_2 /water fracturing tests under various horizontal stress difference ratio

入压力曲线存在初始压力。主要原因在于采用自增压液氮罐为高压液氮罐灌满液氮时，高压液氮罐内液氮存在一定压力，在室温条件下，高压液氮罐(图3)中的液氮受热膨胀，压力升高。因此，液氮压裂曲线存在2 MPa左右初始压力。二是在试样压裂后，液氮循环压裂注入压力难以稳定在固定值。其主要原因在于液氮黏度较低，且液氮循环压裂试样裂缝导流能力较强^[21]。当试样破裂后，高压液氮迅速气化流出，不易在裂缝中形成稳定渗流，注入压力一般直接下降。

起裂压力是指注入流体时的峰值压力，可以用来表征不同实验条件下岩样的起裂特征。对比起裂压力可以发现，在相同条件下，液氮循环压裂相对于清水压裂起裂压力降低47.1%~50.0%，主要原因在于液氮与PMMA试样的巨大温差所产生的强烈热冲击易在井眼周围诱发热应力裂缝。液氮注入压力和试样一

低温液氮接触产生的热应力主要表现为井筒周围的拉应力^[32]。注入压力引起的拉应力与热应力相互叠加，使得温度极低的液氮更容易使试样达到拉伸破坏状态^[33]。此外，液氮和清水的黏度不同，对裂缝起裂有较大影响，黏度较低的液氮具有较强的穿透能力，与水相比，液氮更容易穿透试样热应力裂缝并通过裂缝渗流^[34-35]。因此，液氮的低黏度和超低温特性是降低试样起裂压力的关键因素。当水平应力差异系数从0增大至1时，液氮循环压裂和清水循环压裂起裂压力均有所下降，这与前人的研究规律一致^[21, 34]。

不同循环次数下液氮与清水循环压裂注入压力曲线如图7所示。可以发现，当循环次数从1增加至5时，液氮循环压裂相对于清水循环压裂起裂压力分别降低47.1%，64.2%和71.7%。主要原因在于：液氮循环冷却过程中可在井周形成的大量热应力裂缝，可

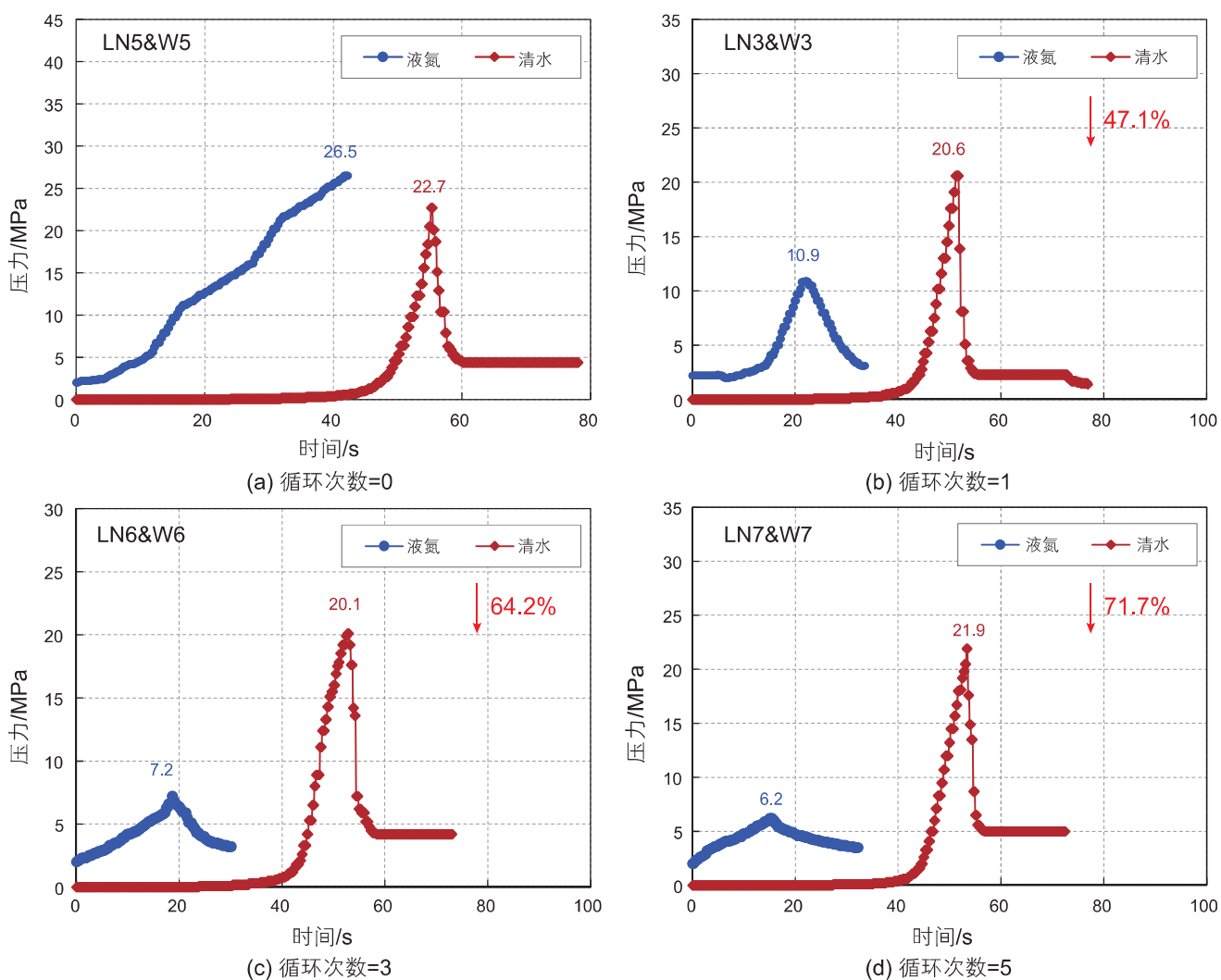


图7 不同循环次数下液氮与清水循环压裂注入压力曲线

Fig. 7 Pressure-time curves of the cyclic LN₂/water fracturing tests under various number of cycles

有效降低岩石杨氏模量、抗拉强度、抗压强度和断裂韧性,提高岩石渗透率和孔隙度,促进热应力裂缝与岩石天然裂缝、孔洞沟通,且循环次数越多,作用效果越显著^[24,36]。因此,液氮循环冷却对液氮循环压裂有重要作用,在液氮循环冷却下,试样经受交变热应力—流体压力耦合作用不断发生损伤,这些损伤的逐步累积有利于进一步降低起裂压力。起裂压力的降低有利于干热岩压裂现场安全高效作业^[18]。然而,当循环次数为0时,即直接注入高压液氮压裂时(管线、井筒和井周试样在高压液氮注入前为常温),液氮循环压裂试样注入压力达到26.5 MPa也未能起裂(考虑

到高压液氮罐最大耐压30 MPa,当液氮注入压力达到26.5 MPa时,停止实验)。主要原因是当低温液氮直接注入井筒时,与常温PMMA试样接触换热后迅速气化膨胀,而气化形成的温度较高的氮气并不能迅速排出,导致井底液氮与PMMA试样间冷却换热效率较低,难以在井筒周围形成强烈热冲击,类似于我们前期研究中的高压氮气压裂^[21],因而起裂压力较高。

2.3 裂缝形态特征分析

不同水平应力差异系数下压裂后PMMA试样裂缝形态如图8所示。可以发现,液氮循环压裂裂缝多为

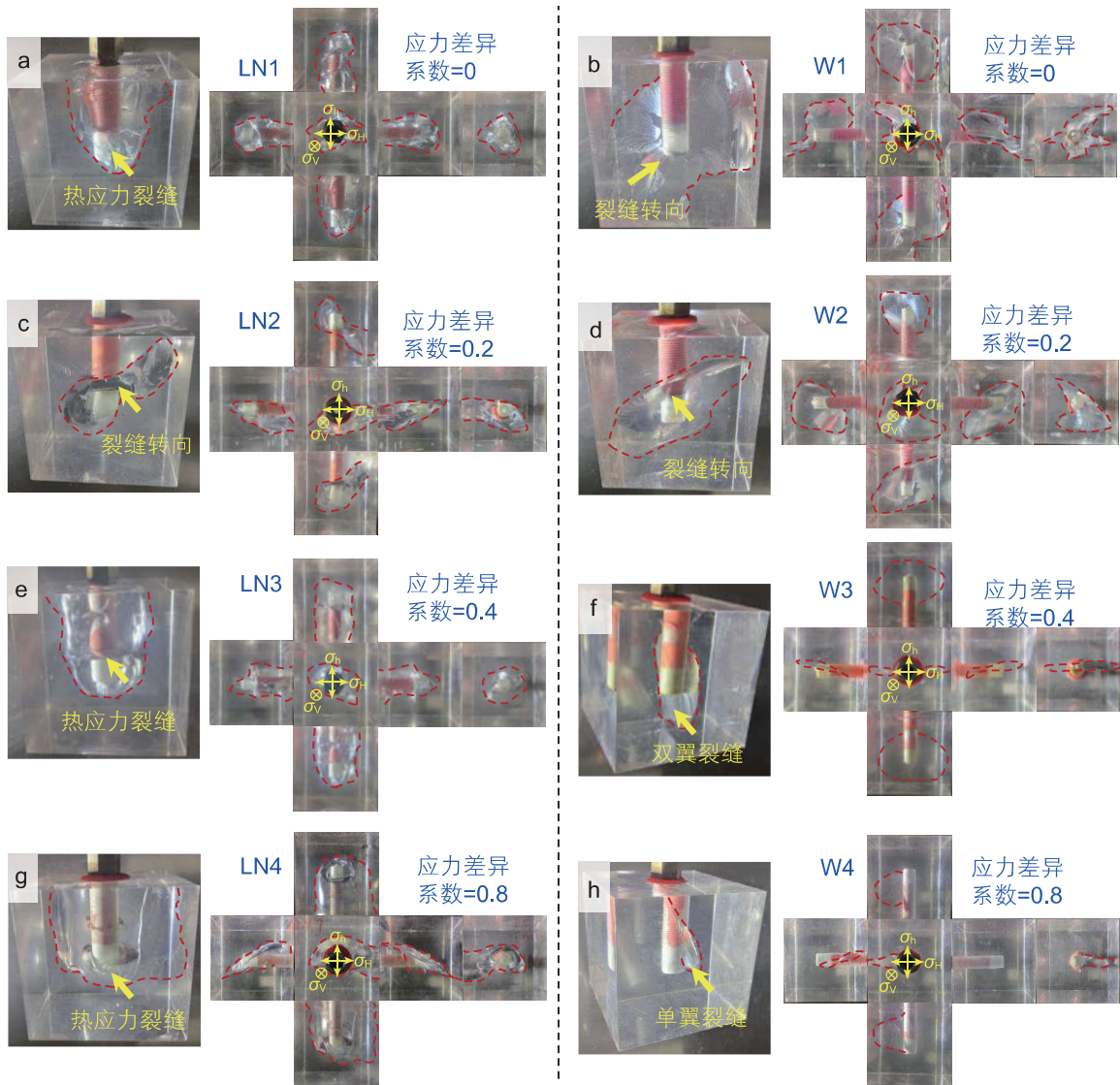


图8 不同水平应力差异系数下PMMA试样裂缝形态:(a)液氮,应力差异系数=0;(b)清水,应力差异系数=0;(c)液氮,应力差异系数=0.2;(d)清水,应力差异系数=0.2;(e)液氮,应力差异系数=0.4;(f)清水,应力差异系数=0.4;(g)液氮,应力差异系数=0.8;(h)清水,应力差异系数=0.8。

Fig. 8 Fracture patterns of PMMA under various horizontal stress difference ratio. The fracturing fluid and horizontal stress difference ratio (R) are: (a) LN_2 , $R=0$; (b) Water, $R=0$; (c) LN_2 , $R=0.2$; (d) Water, $R=0.2$; (e) LN_2 , $R=0.4$; (f) Water, $R=0.4$; (g) LN_2 , $R=0.8$; (h) Water, $R=0.8$.

主裂缝+热应力裂缝，即在主裂缝周围多发育不受地应力方向控制的热应力裂缝，且主裂缝迂曲度较大，而清水循环压裂多为单一裂缝。此外，当应力差异系数为0和0.2时(水平应力差分别为0和1.5 MPa)，主裂缝易发生转向，裂缝体积较大；当应力差异系数为0.4时(水平应力差为3 MPa)，清水循环压裂为沿最大水平主应力方向的双翼裂缝，裂缝体积明显小于液氮循环压裂；当应力差异系数为0.8时(水平应力差为4.5 MPa)，清水循环压裂仅形成单翼裂缝，裂缝体积显著小于液氮循环压裂。其主要原因在于，在液氮循环冷却作用下，井周易形成不受地应力控制的热应力

裂缝，并对井周应力场产生干扰，当高压液氮注入时，热应力裂缝易诱导主裂缝偏离最大水平主应力方向扩展、分叉^[22, 37]。因此，对于清水循环压裂，在较低的应力差异系数下，裂缝体积更大，而对于液氮循环压裂，在不同的应力差异系数下均能取得很好的储层改造效果。说明液氮循环压裂不易受水平应力差异系数控制，热应力裂缝对改变井周应力分布，促进形成复杂缝网有重要作用，在应力差异系数较大的干热岩储层中仍然能达到较好的储层改造效果。

不同循环次数下压裂后的PMMA试样裂缝形态如图9所示。可以发现，循环次数对液氮循环压裂影

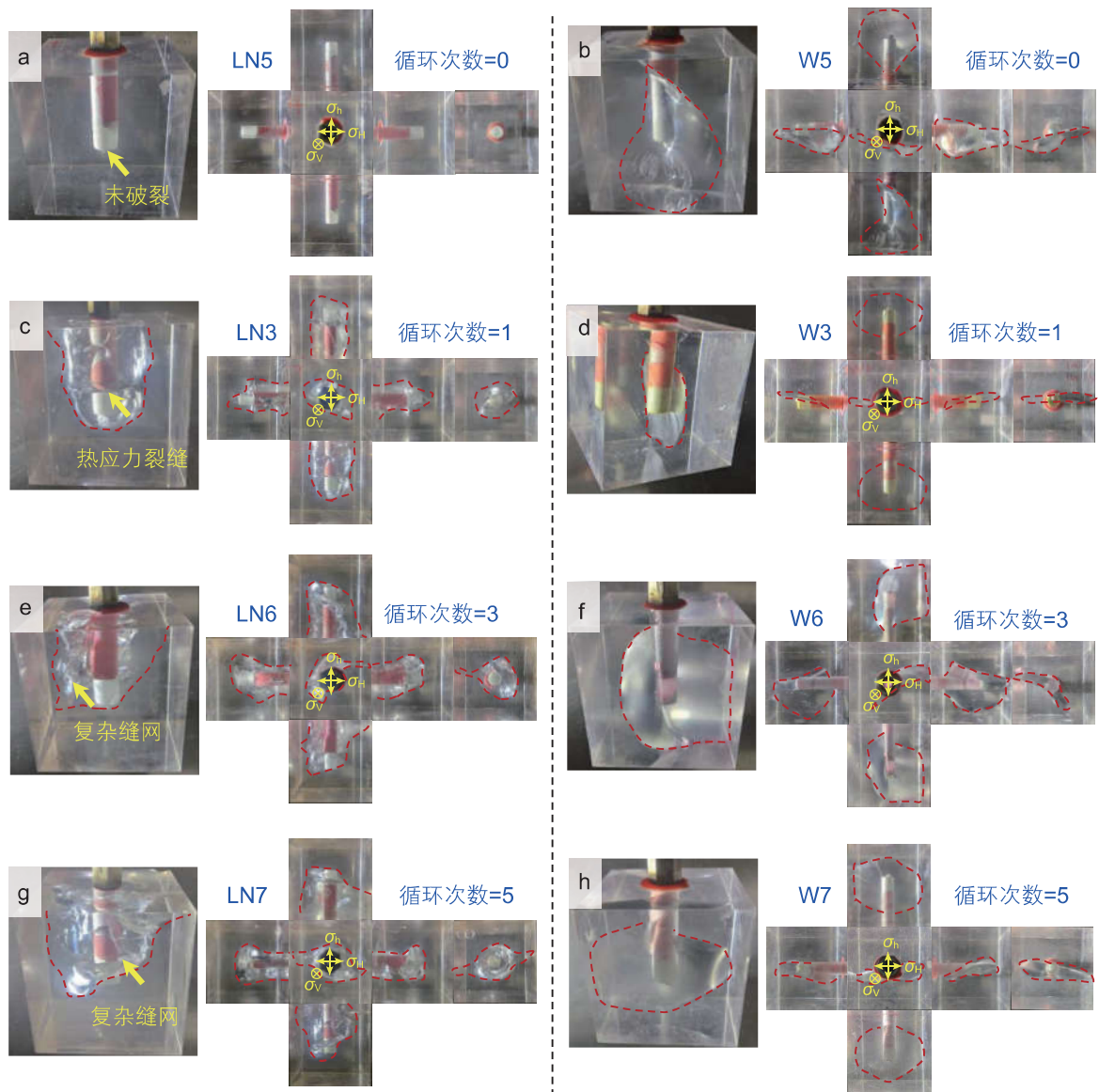


图9 不同循环次数下压裂后PMMA试样裂缝形态：(a)液氮，循环次数=0；(b)清水，循环次数=0；(c)液氮，循环次数=1；(d)清水，循环次数=1；(e)液氮，循环次数=3；(f)清水，循环次数=3；(g)液氮，循环次数=5；(h)清水，循环次数=5。

Fig. 9 Fracture patterns of PMMA under various number of cycles. The fracturing fluid and number of cycles (C) are: (a) LN₂, C=0; (b) Water, C=0; (c) LN₂, C=1; (d) Water, C=1; (e) LN₂, C=3; (f) Water, C=3; (g) LN₂, C=5; (h) Water, C=5.

响较大,当循环次数为0时,PMMA试样未发生破裂(考虑到高压液氮罐最大耐压30 MPa,当液氮注入压力达到26.5 MPa时,停止实验);当循环次数为1~5时,裂缝复杂程度随循环次数增大而增大。说明井周储层岩石中的热应力裂缝可有效改变井周应力分布,诱导主裂缝起裂,有利于在井周形成以“热应力裂缝+主裂缝”为特征的复杂缝网。而对于清水循环压裂,PMMA试样并未发生明显疲劳损伤,因而起裂压力和裂缝的复杂程度基本未发生变化,且裂缝均为单一裂缝,未能取得前人研究^[16,38]中较高循环次数和循环注入压力下的良好造缝效果。主要原因在于液氮循环压裂耦合交变热应力—流体压力作用对高温储层造成疲劳损伤,而清水循环压裂主要依赖交变水力载荷对储层造成疲劳破坏。然而,在较低的循环次数和循环注入压力下,单一交变流体压力作用较弱,导致清水循环压裂对储层的疲劳损伤效果较差。此外,PMMA试样较为致密,在清水低压泵注条件下,不易进入试样

中形成孔隙压力,因而难以诱导裂缝起裂并降低起裂压力。因此,液氮循环冷却可有效损伤储层岩石,在较低的循环次数和循环注入压力下仍能取得良好的造缝效果,且储层改造体积随循环次数有显著提升,这对提升EGS取热效率、促进EGS安全高效开发有重要意义。

3 讨论

根据前人的研究工作和本文的室内实验,可将液氮循环压裂干热岩复杂缝网形成机理概括如下(图10)。

(1)交变热应力诱导裂缝形成(图10a)。液氮注入过程中,井周储层岩石急剧冷却,发生体积收缩并产生拉应力,造成大面积岩石损伤破裂。当停止注入液氮后,储层岩石逐渐升温,形成二次热损伤,热—冷循环作用产生的交变热应力促使岩石发生强烈热损伤,且热损伤随循环次数增加而逐渐累积,进一步加剧了

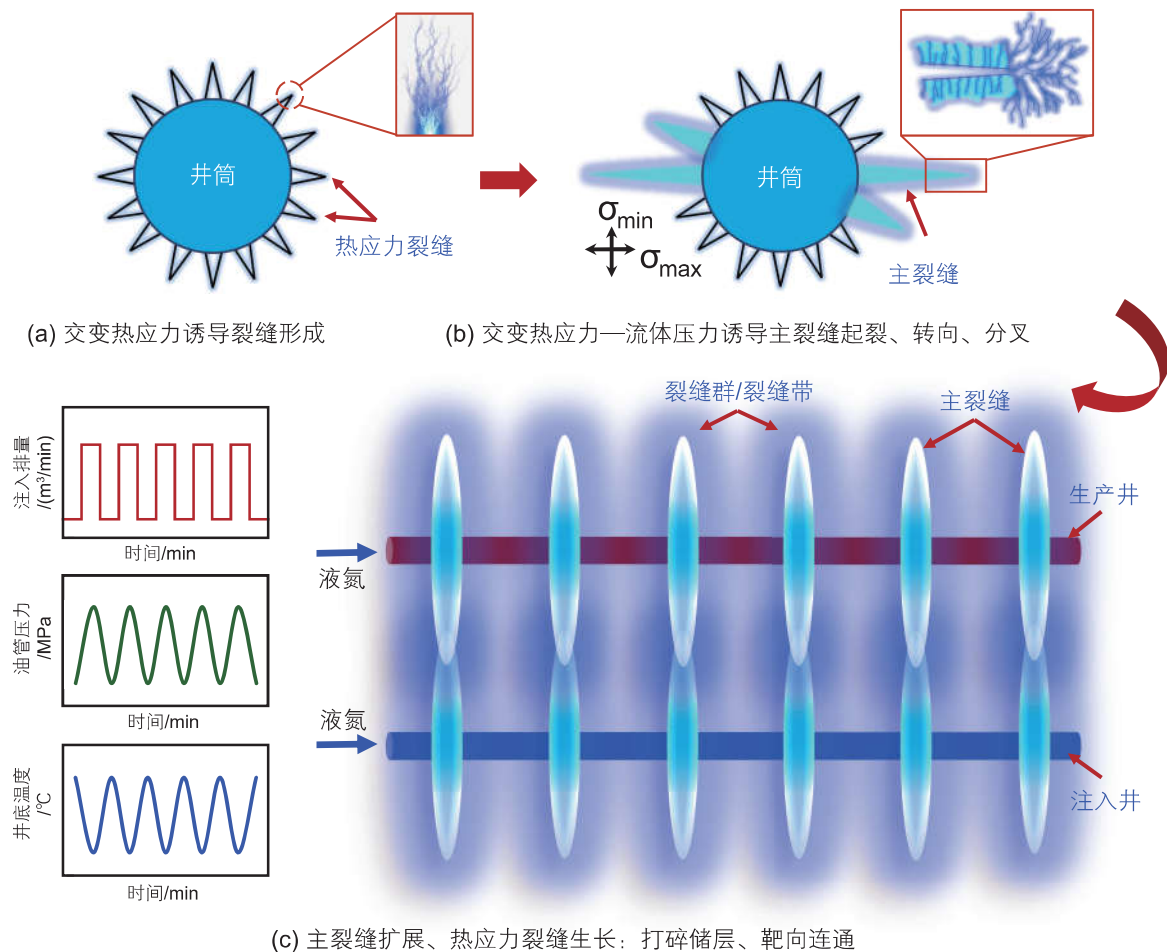


图10 液氮循环压裂干热岩复杂缝网形成机理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of cyclic LN₂ fracturing mechanism

热应力裂缝的形成,有助于储层岩石天然裂缝、孔洞的扩展和沟通。

(2) 交变热应力—流体压力诱导主裂缝起裂(图 10b)。液氮循环泵注会改变储层渗流场和应力场,交变热应力—流体压力叠加后诱导的拉应力大于单一流体压力对岩石产生的拉应力,使储层岩石更易发生疲劳破坏。此外,井周储层岩石中的热应力裂缝可改变井周应力场分布,诱导主裂缝起裂、转向、分叉,有利于在井周形成以“热应力裂缝+主裂缝”为特征的复杂缝网。

(3) 主裂缝扩展、热应力裂缝生长:打碎储层、靶向连通(图 10c)。在交变热应力—流体压力耦合作用下,主裂缝逐渐扩展,并在主裂缝周围不断形成热应力裂缝,进一步提升储层造缝效果,促进注入井与生产井的靶向连通。

可以发现,液氮循环压裂技术主要是利用交变热应力—流体压力耦合作用促使储层岩石发生疲劳破坏,进而诱导主裂缝起裂、转向、分叉,并与热应力裂缝不断扩展演化、相互搭接连通,最终使注入井与生产井之间形成立体缝网,构建出高效的取热通道。总体上看,液氮循环压裂相对于清水循环压裂能以较低的循环次数和循环注入压力实现较好的造缝效果,在现场有广阔的应用前景,有望为干热岩绿色经济高效开发提供新途径。研究结果可望为液氮循环压裂开发干热岩提供理论依据和实验基础。

4 结论

本文提出了液氮循环压裂开发干热岩资源新方法,

采用自主研发的真三轴液氮循环压裂实验设备,基于可视化材料 PMMA,揭示了液氮循环压裂裂缝起裂与形态特征,并与清水循环压裂进行了对比。此外,还结合前人研究基础,分析了液氮循环压裂造缝机理。主要得出以下结论。

(1) 在较低的循环次数和循环注入压力下,清水循环压裂多形成单一裂缝,而液氮循环压裂相对于清水循环压裂可显著降低起裂压力(降幅可达 47.1%~71.7%),形成以“热应力裂缝+主裂缝”为特征的复杂缝网,有望提升 EGS 系统取热效率,促进干热岩安全高效开发;

(2) 随着水平应力差异系数的增大,清水循环压裂储层改造体积显著下降,但液氮循环压裂不易受水平应力差异系数控制,在较大水平应力差异系数下仍能取得较好的造缝效果;

(3) 液氮循环冷却对降低裂缝起裂压力和形成复杂缝网有重要作用,随循环次数的增加,起裂压力降低幅度和裂缝复杂程度均显著增大,当直接采用高压液氮压裂时,起裂压力甚至会超过清水压裂;

(4) 结合前人的研究基础和本文研究工作,可将液氮循环压裂干热岩复杂缝网形成机理概括为:交变热应力诱导裂缝形成、交变热应力—流体压力诱导主裂缝起裂和主裂缝扩展和热应力裂缝生长:打碎储层、靶向连通;

(5) 总体来看,液氮循环压裂相对于清水循环压裂能以较低的循环次数和循环注入压力实现较好的造缝效果,有望为干热岩绿色经济高效开发提供新途径。研究结果可望为液氮循环压裂开发干热岩提供理论依据和实验基础。

参考文献

- [1] ANDERSON A, REZAIIE B. Geothermal technology: Trends and potential role in a sustainable future [J]. Applied Energy, 2019, 248: 18–34.
- [2] BREEDE K, DZEBISASHVILI K, LIU X L, et al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future [J]. Geothermal Energy, 2013, 1(1): 1–27.
- [3] 石宇, 宋先知, 李根生, 等. 多分支井地热系统 CO₂ 与水的取热效果对比 [J]. 天然气工业, 2021, 41(11): 179–190. [SHI Y, SONG X Z, LI G S, et al. Comparison of heat extraction performance between CO₂ and water in a multilateral-well geothermal system [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(11): 179–190.]
- [4] OLASOLO P, JUÁREZ M C, MORALES M P, et al. Enhanced geothermal systems (EGS): A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 133–44.
- [5] 许天福, 胡子旭, 李胜涛, 等. 增强型地热系统: 国际研究进展与我国研究现状 [J]. 地质学报, 2018, 92(9): 1936–1947. [XU T F, HU Z X, LI S T, et al. Enhanced geothermal system: International progresses and research status of China [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9): 1936–1947.]
- [6] 周舟, 金衍, 卢运虎, 等. 干热岩地热储层钻井和水力压裂工程技术难题和攻关建议 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(12): 124621. [ZHOU Z, JIN Y, LU Y H, et al. Present challenge and prospects of drilling and hydraulic fracturing technology for hot

- dry rock geothermal reservoir [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, 48(12): 124621.]
- [7] RAHIMI-AGHDAM S, CHAU V-T, LEE H, et al. Branching of hydraulic cracks enabling permeability of gas or oil shale with closed natural fractures [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(5): 1532–1537.
- [8] BROWN D W, DUCHANE D V, HEIKEN G, et al. *Mining the earth's heat: hot dry rock geothermal energy* [M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [9] LU S-M. A global review of enhanced geothermal system (EGS) [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2902–2921.
- [10] 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): 1003–1006.
- [11] ZANG A, YOON J S, STEPHANSSON O, et al. Fatigue hydraulic fracturing by cyclic reservoir treatment enhances permeability and reduces induced seismicity [J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 195(2): 1282–1287.
- [12] 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(27): 1–33.
- [13] 赵子江, 刘大安, 崔振东, 等. 循环渐进升压对页岩压裂效果的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S1): 2779–2789. [ZHAO Z J, LIU D A, CUI Z D, et al. Cyclic progressive pressure on the fracturing effect of shale [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S1): 2779–2789.]
- [14] ZANG A, ZIMMERMANN G, HOFMANN H, et al. How to reduce fluid-injection-induced seismicity [J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2019, 52(2): 475–493.
- [15] HOFMANN H, ZIMMERMANN G, FARKAS M, et al. First field application of cyclic soft stimulation at the Pohang Enhanced Geothermal System site in Korea [J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 217(2): 926–949.
- [16] PATEL S M, SONDERGELD C H, RAI C S. Laboratory studies of hydraulic fracturing by cyclic injection [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 95: 8–15.
- [17] 梁天成, 刘志云, 付海峰, 等. 多级循环泵注水力压裂模拟实验研究 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(S1): 355–361. [LIANG T C, LIU Y Z, FU H F, et al. Experimental study of hydraulic fracturing simulation for multistage circulating pump injection [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S1): 355–361.]
- [18] ZANG A, ZIMMERMANN G, HOFMANN H, et al. How to reduce fluid-injection-induced seismicity [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 52(2): 475–493.
- [19] AKHONDZADEH H, KESHAVARZ A, AL-YASERI A Z, et al. Pore-scale analysis of coal cleat network evolution through liquid nitrogen treatment: A Micro-Computed Tomography investigation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 219: 103370.
- [20] 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(7): 2123–2139.
- [21] YANG R Y, HONG C Y, LIU W, et al. Non-contaminating cryogenic fluid access to high-temperature resources: Liquid nitrogen fracturing in a lab-scale Enhanced Geothermal System [J]. *Renewable Energy*, 2021, 165: 125–138.
- [22] CHA M, ALQAHTANI N B, YAO B, et al. Cryogenic fracturing of wellbores under true triaxial-confining stresses: experimental investigation [J]. *SPE Journal*, 2018, 23(4): 1271–1289.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] RONG G, SHA S, LI B, et al. Experimental investigation on physical and mechanical properties of granite subjected to cyclic heating and liquid nitrogen cooling [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(5): 2383–2403.
- [26] CHA M, ALQAHTANI N B, YIN X, et al. Propagation of cryogenic thermal fractures from unconfined pmma boreholes [J]. *Energies*, 2021, 14(17): 5433.
- [27] GAN Q, ELSWORTH D, ALPERN J S, et al. Breakdown pressures due to infiltration and exclusion in finite length boreholes [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 127: 329–37.
- [28] KHADRAOUI S, HACHEMI M, ALLAL A, et al. Numerical and experimental investigation of hydraulic fracture using the synthesized PMMA [J]. *Polymer Bulletin*, 2020, 78(7): 3803–3820.
- [29] HONG C, YANG R, HUANG Z, et al. Enhance liquid nitrogen fracturing performance on hot dry rock by cyclic injection [J]. *Petroleum Science*, 2022.
- [30] LEI Z, ZHANG Y, YU Z, et al. Exploratory research into the enhanced geothermal system power generation project: The Qiabuqia geothermal field, Northwest China [J]. *Renewable Energy*, 2019, 139: 52–70.
- [31] LI R, WU X G, HUANG Z W. Jet impingement boiling heat transfer from rock to liquid nitrogen during cryogenic quenching [J].

- Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 106: 255–264.
- [32] 张伟, 曲占庆, 郭天魁, 等. 热应力影响下干热岩水压致裂数值模拟 [J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 2001–2008. [ZHANG W, QU Z Q, GUO T K, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing in hot dry rocks under the influence of thermal stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 2001–2008.]
- [33] ZHANG W, GUO T K, QU Z Q, et al. Research of fracture initiation and propagation in HDR fracturing under thermal stress from meso-damage perspective [J]. Energy, 2019, 178: 508–521.
- [34] YANG R Y, HONG C Y, HUANG Z W, et al. Liquid nitrogen fracturing in boreholes under true triaxial stresses: laboratory investigation on fractures initiation and morphology [J]. SPE Journal, 2021, 26(1): 135–154.
- [35] WANG L, YAO B W, CHA M, et al. Waterless fracturing technologies for unconventional reservoirs-opportunities for liquid nitrogen [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 35: 160–174.
- [36] FENG G, WANG X C, KANG Y, et al. Effect of thermal cycling-dependent cracks on physical and mechanical properties of granite for enhanced geothermal system [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 134: 104476.
- [37] HONG C, YANG R, HUANG Z, et al. Fracture Initiation and Morphology of Tight Sandstone by Liquid Nitrogen Fracturing [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(3): 1285–301.
- [38] ZHUANG L, ZANG A. Laboratory hydraulic fracturing experiments on crystalline rock for geothermal purposes [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 216: 103580.

(编辑 马桂霞)