

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.2233

注 CO₂ 条件下花岗岩破裂特征的试验研究

徐辰宇^{1,2}, 白 冰², 刘明泽²

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068 ;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要 : CO₂ 增强型采热系统 (CO₂-EGS) 工程中 CO₂ 作用下岩石的水压破裂行为是目前亟需解决的一个关键科学问题。从福建漳州采取花岗岩露头, 利用自主研制的厚壁圆筒式致裂仪进行了不同流体 (CO₂、水) 的水压致裂试验, 研究了 CO₂、水入渗致裂后花岗岩的破裂特征及破裂机制。研究表明: 随着致裂液黏度的减小, 试样破裂过程会形成更多且更曲折的微裂纹分支, 这意味着, 采用 CO₂ 压裂可能更有利于形成缝网, 从而有助于提高增强型采热 (EGS) 工程中换热效率; 试样的破裂压力随着致裂液黏度的减小而降低, 而较低的破裂压有助于注入井的安全运行; 试验结果可用从对流换热角度分析的流体岩石相互作用机制解释, 进而验证了其准确性。

关 键 词 : 破裂特征; 换热系数; 流体黏度; 水力压裂; CO₂-EGS

中图分类号 : TU 454

文献标识码 : A

文章编号 : 1000 - 7598 (2019) 04 - 1474 - 09

Experimental study of the fracture characteristics of granite under CO₂ injection condition

XU Chen-yu^{1,2}, BAI Bing², LIU Ming-ze²

(1. School of Civil Engineering and Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The hydraulic fracturing (HF) behavior under CO₂ condition is a key scientific issue in CO₂-enhanced geothermal system project. The granite specimen was taken from the quarry in Zhangzhou, Fujian province. HF experiments were conducted to investigate the effects of CO₂ and H₂O on the HF process and crack propagation by using a new independently developed hollow cylinder. This study reveals that with the decrease of the viscosity of the fracturing fluid, a greater number and more sinuous microcrack branches form in the fracture process. This indicates that CO₂ fracturing may be more conducive to the formation of the crack network, which helps to increase the heat exchange efficiency in the CO₂-EGS projects. The fracture pressure of the specimen decreases with decreasing the viscosity of the fracturing fluid, which leads to the safe operation of the injection well with a lower value. The experimental results consist with the interaction mechanism of fluid rock from the convective heat transfer perspective, and its accuracy is verified.

Keywords: fracture characteristics; heat transfer coefficient; fluid viscosity; hydraulic fracturing; CO₂-EGS

1 引 言

增强型地热系统 (EGS) 是采用人工压裂形成地热储层的方法, 从低渗透岩体中经济地采出深层热能的人工地热系统。目前, 换热介质主要是水, CO₂-增强型采热系统 (CO₂-EGS) 由 Brown^[1] 提出用 CO₂ 代替水作为换热介质注入到地层中, 此时,

CO₂ 主要起流动换热的作用^[2], 同时, 由于 CO₂ 的注入, 地层中会有部分残留其中, 工程还兼具封存 CO₂ 的作用^[3]。CO₂-EGS 效率高低主要由造缝能力和换热能力两个方面决定, 而地层岩石的造缝能力主要与注入的流体有关。流体作用下的岩石破裂行为是个复杂的问题, 属于水力耦合范畴。目前, 水作为致裂液的相关研究已有很多^[4-6], 但由于 CO₂、

收稿日期: 2017-11-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 41672252); “十二五”国家科技支撑项目课题 (No. 2014BAC18B01); 国家重点研发计划中美清洁能源联合研究中心项目 (CERC) (No. 2016YFE0102500)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41672252), the Supporting Program of the “Twelfth Five-Year Plan” for Sci. & Tech. Research of China (2014BAC18B01) and the National Key Research and Development Plan (CERC) (2016YFE0102500).

第一作者简介: 徐辰宇, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事 CO₂ 地质封存相关的岩石力学方面的研究工作。E-mail: xcy378464@126.com

通讯作者: 白冰, 男, 1980 年生, 博士, 研究员, 主要从事 CCUS 相关的研究。E-mail: bai_bing2@126.com

水的物性及分别与岩石之间的物化作用机制不同，注 CO₂ 与注水条件下岩石的强度、变形、裂纹起裂扩展及损伤差异明显，因此，CO₂ 作用下岩石的水压破裂行为是目前工程地质和地球科学亟需解决的一个关键科学问题。

入渗流体会与岩石发生物理化学作用从而可能影响岩石的破裂，而化学作用一般在长期作用下才会产生明显效果，并且这方面已有大量的研究^[7-8]，因此，本文仅讨论短期内 CO₂、水入渗对岩石破裂的影响。国内外的文献中关于注水致裂问题进行了较多的研究，相关的机制和起裂、扩展公式都有详尽的描述，如 Morita^[9]和 Oort^[10]等指出，可渗透岩石的扩展应力主要由两种能量消耗机制所决定；Hubbert 等^[11]率先建立了钻孔扰动引起裂隙的起裂模型；Haimson 等^[12-13]在 Hubbert 等的基础上建立了考虑致裂液入渗影响的起裂模型；Morita 等^[14]指出，起裂压力等于孔洞上的切应力和岩石的抗拉强度之和。而采用 CO₂ 致裂岩石的相关文章则比较缺少，其中花岗岩的致裂更加有限，对其破裂特征和机制的解释远远不够。目前的文献中，流体对岩石的作用主要分为孔隙流体作用和裂隙流体作用两类^[15]，由于花岗岩较为致密的物理性质（如非常小的孔隙率），CO₂ 入渗花岗岩属于裂隙流体作用，基于此类的文献对机制的分析主要从 CO₂ 与花岗岩物化作用（主要为溶解和沉淀，属长期作用，本文不做分析）微细观力学机制和 CO₂ 的物性等角度进行。其中微细观力学机制方面有：Li 等^[16]利用声发射系统监测花岗岩在注入 CO₂ 时的破坏特征，研究发现，CO₂ 的注入加速了孔压的变大，导致有效应力迅速降低，进而岩石突变失稳；Lei 等^[17]对与花岗岩同为结晶质岩的安山岩进行了研究，发现 CO₂ 的注入促进了岩石内裂纹的成核与扩展是导致岩石突变失稳主要原因；Ishida 等^[4]从断裂力学角度入手并根据 Zoback 等^[5-6]对张拉破坏时裂纹受力情况的划分（即非稳定状态和稳定状态），认为低黏度致裂液入渗接近于非稳态情况，高黏度致裂液则更接近于稳定情况，而非稳定情况下，岩石微裂纹更加容易扩展，会形成更多的再生微裂纹。CO₂-EGS 工程中，地层中的 CO₂ 多处于超临界状态，其物性与水相比主要区别是高密度、低黏度、更易扩散和相变，因此，从物性角度分析也必不可少；Ishida 等^[18-20]对尺寸为 19 cm×19 cm×19 cm 的花岗岩进行了研究，先后使用油、水、液态 CO₂ (LCO₂) 和超临界态 CO₂ (scCO₂) 不同黏度流体进行入渗致裂试验，认为低黏度流体

入渗易于在空间上形成弯曲复杂裂缝而高黏度流体则易于在平面上形成单一裂缝，同时还发现，致裂液黏度越低岩石破裂压越低；Chen 等^[21]通过油、水和 scCO₂ 研究了不同黏度流体对花岗岩裂纹扩展机制的影响，观察到黏度最小的 scCO₂ 易造成剪破坏，并且在主破裂面上形成了大量的微裂纹分支。由上可知，目前研究主要是对试验相关的现象进行描述，相关的分析角度和机制解释明显不足，因此，本文在 CO₂、水入渗致裂花岗岩试验的基础上从对流换热角度对流体入渗致裂岩石的机制进行了解释。

本文基于自主开发的厚壁圆筒式致裂仪，分别在不同流体，不同围压的条件下开展了花岗岩致裂试验。随后，结合试验现象及数据分析比较了 CO₂、水作用下花岗岩的破裂特征。最后，从流体对流换热角度解释了不同流体对岩石破裂影响的相关机制。

2 试样与装置

2.1 试验样品

作者从漳州当地（见图 1）取得了花岗岩岩层露头作为试验材料。试样经过加工处理，制成外径 5 cm，内径 2 cm，高为 10 cm 的圆筒型试样，见图 2，试样尺寸按照 ISRM 规范^[22]确定。



图 1 福建漳州采石点

Fig.1 Quarry in Zhangzhou, Fujian Province



图 2 花岗岩厚壁圆筒试样

Fig.2 Thick hollow cylinder sample of granite

2.2 试验装置

本试验的所有试验都在自主研发的厚壁圆筒式致裂仪上进行。装置的实物图如图 3 所示，组成示意图如图 4 所示。该装置由三向加载子系统、压力室和数据采集子系统 3 个部分组成。



图 3 厚壁圆筒式致裂仪实物图^[23]

Fig.3 The photograph of the new developed hollow-cylinder tensile equipment^[23]

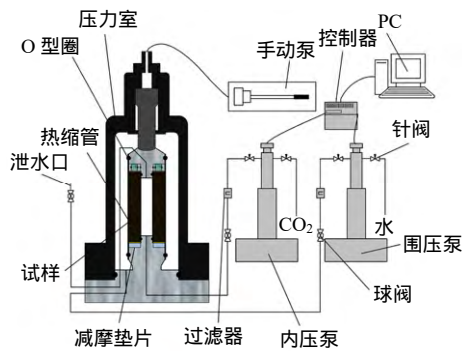


图 4 厚壁圆筒式致裂仪组成示意图^[24]

Fig.4 The schematic diagram of the new developed hollow-cylinder tensile equipment^[24]

三向加载子系统由 2 台计量泵 (ISCO 100D, ISCO 260D) 和手动油泵组成, 分别用于加载围压、内压和轴压。计量泵可精确控制压力与流量, 并实时记录压力、流量和体积数据。计量泵的加载方式主要有恒压和恒流两种模式。厚壁圆筒试样在轴压、围压和内压的作用下处于最小主应力为负的真三轴应力状态下, 与注入高压流体时井底围岩的应力状态相似。通过 Lamé 公式可以计算分析试样内部的应力状态:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{P_c R_2^2 - P_i R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{(P_c - P_i) R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \\ \sigma_\theta &= \frac{P_c R_2^2 - P_i R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{(P_c - P_i) R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_r 、 σ_θ 分别为径向应力和周向应力 (MPa); P_c 、 P_i 分别为围压和内压 (MPa); R_1 、 R_2 分别为内径和外径 (m); r 为所计算点处的半径 (m)。厚

壁圆筒试样受力状态如图 5 所示, 其中 q 为轴压 (MPa)。

本文采用的是花岗岩, 孔隙率较小, 且在室温条件下试验。压力室的详细剖面结构可见示意图 4。试验过程中围压流体为蒸馏水, 围压流体与试样间通过特氟龙热缩管阻隔, 而与内压流体间通过 O 型圈密封以阻止压力窜通。该装置的整体耐压能力为 50 MPa。

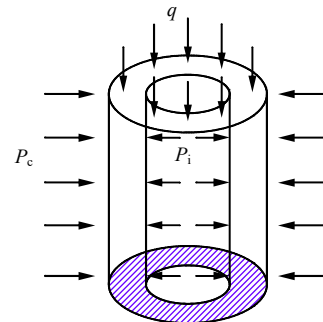


图 5 加载示意图

Fig.5 Schematic diagram of loading

3 试验方案与结果

3.1 试验方案

为了研究不同流体、不同围压条件下的入渗致裂破坏, 本试验设计了 7 组致裂试验, 其中 3 组为 CO₂ 致裂, 另 4 组为水, 试验条件设置见表 1。为消除轴向应力对试验的影响, 其统一设置为 20 MPa。CO₂ 相态变化受温度及压力影响较大, 因此, 试验环境温度在试验前后各测量一次 取均值。由于 CO₂ 与水压缩性的不同, 为了使致裂阶段增压速率大致处于同一区间, 控制 CO₂ 注入速率为 40 mL/min, 水注入速率为 2 mL/min。

表 1 试验工况

Table 1 Test condition

试样编号	流体类型	围压/MPa	温度/K
B10	水	0	288.09
B11		1	287.65
B13		3	288.15
B16		6	288.25
B20	CO ₂	0	289.25
B21		1	288.15
B23		3	288.25

福建漳州地层以下 4 km 的温度是 438.15 K^[25], 在此状态下加压注入流体, CO₂ 普遍是超临界态, 而地表附近由于地层压力、温度都较低, CO₂ 处于

液态。本试验没有使用温度控制系统，结合试验工况和图 6 可知，CO₂ 致裂时处于液体状态 (LCO₂)。相关的不同相态 CO₂、可控温度试验会在以后开展进行。

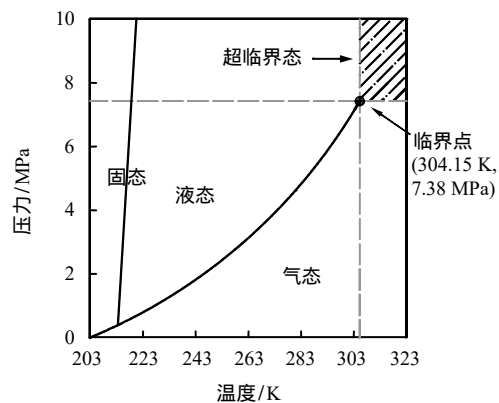


图 6 CO₂ 相图^[20]
Fig.6 Phase diagram^[20] of CO₂

3.2 试验步骤

试验步骤包括试样准备、试样安装、围压加载、试样致裂 4 个阶段。

首先，试样经过加工取回后，应进行干燥处理。将试样放置 313.15 K 的真空环境中 24 h。并且试验前一直贮存在煤油中。

其次是试样安装。用热缩管包裹试样的外表面以隔离围压压力液。在压力室基座端部垫块上依次垫上开有孔洞的聚四氟乙烯薄膜和紫铜片以减少端部摩擦对试验结果的影响。随后，将试样安装到基座，再安装上部垫块到试样，连接相关管路，最后安装钟罩到基座完成试样的安装。

再次，通过手动泵将轴压加到 20 MPa，围压通过计量泵进行加载，待加到所需数值后稳定一段时间即可进入致裂阶段。

最后进行致裂，控制内压计量泵进入恒流模式并以 2 mL/min (CO₂ 注入速率为 40 mL/min) 的流速向内压腔注入流体使内压缓慢持续升高。当内压泵压力读数出现突降时，认为试样已经失稳破裂并停止内压泵。数据采集系统会记录这一过程中内压、围压随时间的变化数据。

3.3 试验结果

3.3.1 花岗岩入渗致裂破坏形态特征

试验结束后，所有试样都发生了不同程度的破坏，如图 7、8 所示。对水入渗致裂的试样 B10、B11、B13、B16 进行观察，没有出现明显的破坏，但试验过程中随着压力的上升，最终试样发生脆性

破裂，内压-时间曲线迅速下降。仔细观察可看出，裂纹的位置及扩展方向是一条沿径向贯穿，而竖向并没有扩展完全的裂纹。图 7 中的红圈即裂纹所在位置及大致走向。

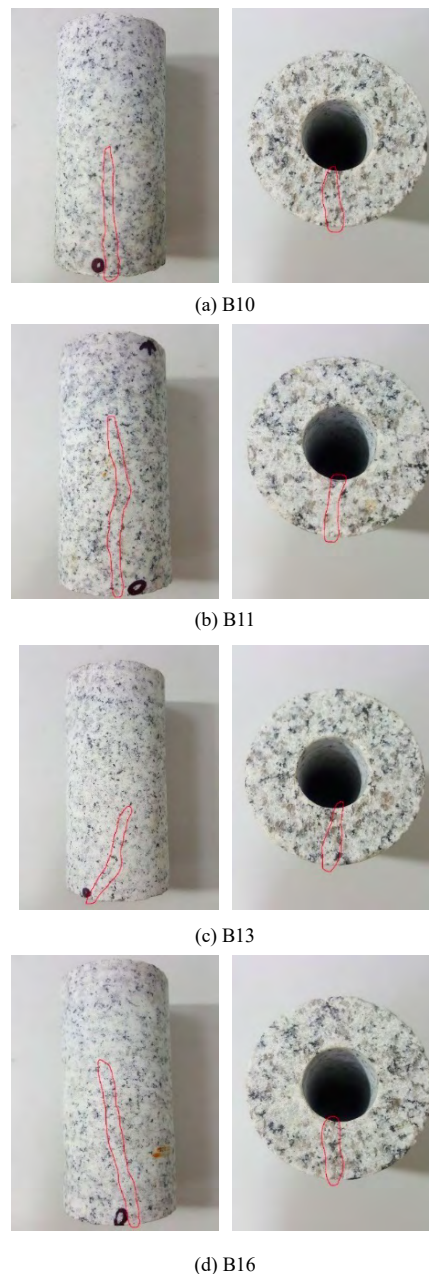


图 7 水致裂试样破坏示意图
Fig.7 Rupture diagram subject to H₂O

图 8 所示的为 LCO₂ 入渗致裂后的试样，全部都发生了完全破裂。进一步分析，无围压试样 B20 与加有围压的试样 B21 和 B23 相比，破裂后呈现为碎块状，而 B21 和 B23 仅分为两块，是沿竖向的劈裂破坏，这说明在无围压的条件下会形成更多贯穿裂缝。作者还发现，试验结束后将试样取出时有大量花岗岩残渣，这里做了清理，没有在图 8 中表现

出来，但我们可以从图中看出破裂后的试样并不能紧密的贴合在一起，这说明 LCO₂ 入渗花岗岩形成了大量的微裂缝。

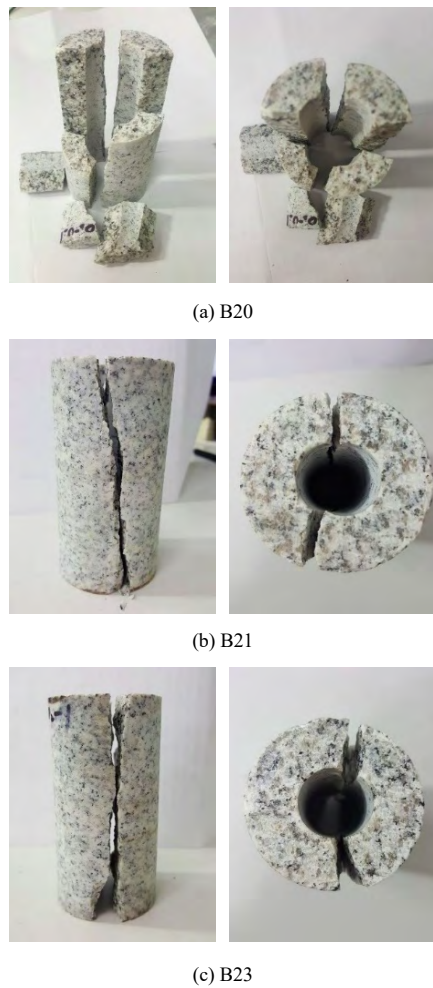


图 8 LCO₂ 致裂试样破坏示意图
Fig.8 Rupture diagram subject to LCO₂

3.3.2 花岗岩入渗致裂破裂压特征

图 9 为不同围压下内压随时间的变化曲线。从图中可看出，压力-时间曲线的变化形态基本一致，即内压随着时间变化不断增加。曲线在某一压力处发生突降，标志着试样的失稳破坏。此时对应的压力即为试样的破裂压力。破裂压力随着围压的增加有不同程度的增大。图 9(b)中三条曲线在致裂过程中会出现压降再继续上升的现象，这是因为，计量泵容积有限，需要不断补充 CO₂，计量泵补充完毕再加压便会出现压降，但并不影响破裂压随围压增加而增大的结论。

试验数据处理结果见表 2。致裂液为水的情况，围压是 0、1.01、3.1、6.22 MPa 时分别对应的破裂压为 6.29、6.92、8.91 MPa 和 12.1 MPa。破裂压随着围压增加而增大，并且破裂压与围压近似呈线性

关系（见图 10）。LCO₂ 为致裂液时同样符合上述规律，围压为 0、1.1、3.2 MPa 对应的破裂压为 5.34、5.98、7.55 MPa。岩石的破裂压力往往与试样的尺寸^[26]、多孔弹性效应^[27]、注入速率^[28]和注入流体的黏度有关。为了消除不同因素对该试验结果的影响，特作此说明：本试验所采用的试样尺寸唯一，且孔隙率很小，故不考虑尺寸效应和多孔弹性效应。大量文章^[24, 28]表明，加压速率与破裂压成正比，但本试验中考虑到相关文献^[18-20]以及根据以往试验经验而设置的注入速率（CO₂注入速率为 40 mL/min，水注入速率为 2 mL/min），加压速率在本试验中并不是影响破裂压的主要因素，因此，本文认为致裂液黏度是影响注 LCO₂ 破裂压小于注水破裂压的主要原因。根据表 2 可知，水的黏度平均值为 1.137 mPa·s，是 LCO₂ 黏度平均值 0.08 mPa·s 的

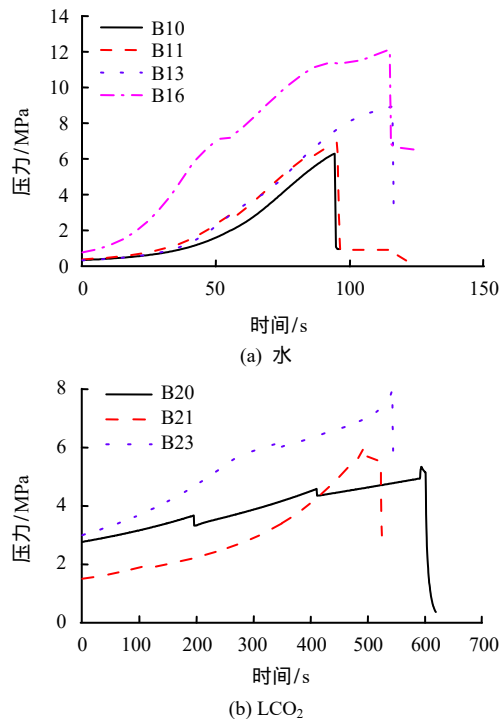


图 9 不同致裂液下破裂压与时间关系曲线
Fig.9 Correlation between time and pressure of the fracturing fluid

表 2 试验数据

Table 2 Experimental data

试样编号	流体类型	温度 /K	黏度 / (mPa·s)	围压 /MPa	破裂压 /MPa
B10	水	288.09	1.136	0.00	6.29
B11		287.65	1.149	1.01	6.92
B13		288.15	1.133	3.10	8.91
B16		288.25	1.129	6.22	12.1
B20	LCO ₂	289.25	0.070	0.00	5.34
B21		288.15	0.080	1.10	5.98
B23		288.25	0.080	3.20	7.55

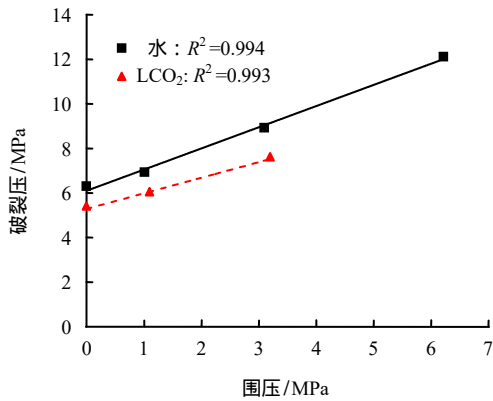


图 10 LCO₂、水入渗时围压与破裂压关系曲线
Fig.10 Correlation between confining pressure and breakdown pressure of LCO₂ and H₂O

14 倍。当 LCO₂、水围压同为 0 MPa 时，LCO₂ 破裂压比水破裂压低 15.1%；围压同为 1 MPa 时，LCO₂ 比水低 13.6%；围压同为 3 MPa 时，LCO₂ 比水低 15.3%。总的来说相同条件下，LCO₂ 破裂压比水破裂压平均低 14.67%。

4 分析与讨论

4.1 CO₂ 与水对花岗岩破裂形态影响的对比分析

由图 7、8 可知，LCO₂、水入渗致裂花岗岩破坏形态有明显区别。水入渗仅有一条没有完全扩展的裂纹，这说明水入渗时仅岩石的优势裂纹会发展成为贯穿面。而 LCO₂ 入渗会形成大量微裂纹，并且岩石沿主裂缝发生了完全的贯穿，这表明，LCO₂ 入渗后会沿着主裂纹产生众多微裂纹分支。同时，试样 B20 和 B21、B23 破裂程度不同，无围压的 B20 破裂块数明显多于有围压的 B21、B23，这说明围压的存在抑制了裂纹的形成。总的来说，黏度更低的 LCO₂ 的造缝能力要强于水。大量的文献都表明压裂液黏度越小越易产生波纹状细小的次生微裂纹，其中包括室内试验研究^[18-20]、数值模拟^[29]和现场试验^[30]，所得到的结论都与本文的现象相符。

图 11 表明了致裂液黏度与破裂压的关系，从图中可以看出黏度对破裂压的影响：LCO₂ 入渗破裂压明显低于水入渗破裂压，为水的破裂压的 84.7%~86.4%。这个趋势与 Ishida 等^[19]观测到的一致。为了表明本试验数据的可靠性，表 3 中列举了一些文献^[19-21]中注入不同黏度流体时的破裂压数据。可以看出，本文试验结果与文献中的规律一致。

4.2 CO₂ 与水对花岗岩破裂影响的机制分析

第 3 节从破裂形态和破裂压两个方面直观地分析了 LCO₂、水入渗对试样破裂特征影响的区别，

验证了水压致裂试验中岩石裂纹数目随致裂液黏度减小而增多，而破裂压随致裂液黏度减小而降低的结论。Hu 等^[15]认为，研究裂隙流体对岩石力学特性的影响时，必须考虑裂隙流体的热力学特性和流动换热特性，其中，Hu 从热力学角度入手，分析了 scCO₂、N₂ 和水 3 种工介在等熵膨胀过程中压力及对外做功的变化，指出 scCO₂ 和 N₂ 相较于水更易于裂缝的发展。而 CO₂-EGS 工程中，裂隙中流体不是绝热变化而会与裂隙壁发生热量交换，因此，本节将会从流体换热特性角度讨论 CO₂ 与水对岩石破裂特征影响的作用机制。

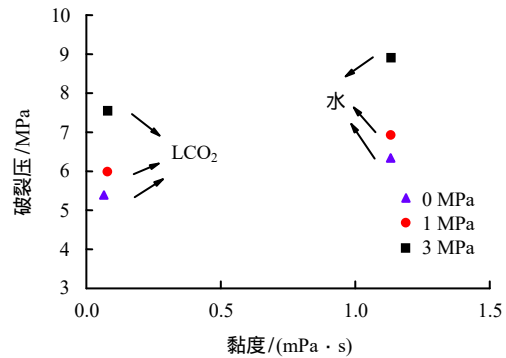


图 11 致裂液黏度与破裂压关系
Fig.11 Effect of fracturing fluid viscosity on breakdown pressure

表 3 本文试验与相关文献数据对比
Table 3 Comparison of breakdown pressure data between published literature and this essay

参考文献	流体类型	黏度 / (mPa · s)	围压 / MPa		破裂压 / MPa
			P_{hmax}	P_{hmin}	
本文	水	1.136	0.00	0.00	6.29
	水	1.149	1.01	1.01	6.92
	水	1.133	3.10	3.10	8.91
	LCO ₂	0.070	0.00	0.00	5.34
	LCO ₂	0.080	1.10	1.10	5.98
	LCO ₂	0.080	3.20	3.20	7.55
	LCO ₂	0.100	1.00	1.00	10.56
Ishida 等 ^[19]	LCO ₂	0.090	1.00	1.00	11.56
	scCO ₂	0.050	1.00	1.00	8.44
	scCO ₂	0.050	1.00	1.00	9.74
	水	0.770	6.00	3.00	13.01
Chen 等 ^[21]	水	0.790	6.00	3.00	13.37
	油	316.8	6.00	3.00	25.05
	油	314.9	6.00	3.00	23.08
	scCO ₂	0.050	6.00	3.00	9.10
	scCO ₂	0.050	6.00	3.00	10.16

4.2.1 起裂公式

岩石的破裂是一个微裂纹不断形成、扩展并贯通形成宏观破裂的过程。水压致裂模型中当岩石周向受力等于拉应力时裂缝发生起裂^[11, 14]，本文需要

考虑由于流动换热而引起的热应力，因此，花岗岩裂纹扩展时尖端环向主要受到 4 种力的影响：内压造成的周向拉应力、围压造成的周向拉应力、裂隙内的流体压力和热应力。花岗岩微裂纹尖端代表性单元受力见图 12，可用式 (2) 表示，当环向所受总应力达到岩石抗拉强度时破坏。

$$\sigma_i + \sigma_c + \sigma_f + \sigma_T = T \quad (2)$$

$$\sigma_i = -\frac{P_i R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_c = \frac{P_c R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_T = C \varepsilon_T, \quad \varepsilon_T = \alpha \Delta T \quad (5)$$

式中： T 为抗拉强度 (MPa)； σ_i 、 σ_c 分别为内压、围压造成的环向拉应力 (MPa)，由式 (1) 变形得到； σ_f 为裂隙内流体的压力 (MPa)； σ_T 为岩石热应力 (MPa)； C 为材料弹性刚度模量； ε_T 为热应力引起的线应变； α 为线热膨胀系数； ΔT 为温度变化 (K)。当温差 ΔT 为正时，岩石膨胀受压，当为负时，收缩受拉。下节将分析当 σ_i 、 σ_c 、 σ_f 相同时，不同流体情况下热应力的变化情况。

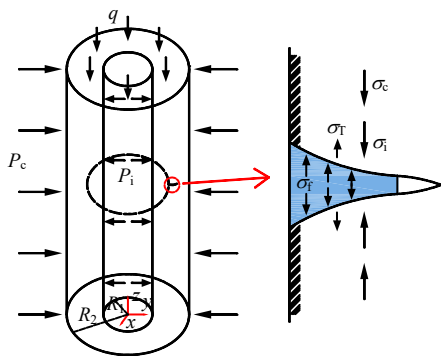


图 12 裂纹尖端代表性单元示意图

Fig.12 Schematic diagram of RVE at the crack tip

4.2.2 机制分析

从式 (5) 中可知热应力与 ΔT 有关，考虑到 EGS 工程中致裂液同时也作为换热介质，因此，对工程中岩石裂隙扩展分析时，可引入对流换热系数 (HTC) 进行分析，该系数是描述换热介质与干热岩之间换热效率常用的指标，本文选取 Chapman^[31] 中介绍的换热系数方程：

$$h = 0.664 \frac{K}{L} \left(\frac{uL}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu C_p}{K} \right) \quad (6)$$

式中： h 为对流换热系数 ($W/(m^2 \cdot K)$)； K 为热传导系数 ($W/(m \cdot K)$)； L 为裂缝长度 (m)； u 为换热介质稳定流速 (m/s)； ν 为换热介质的运动黏度 (m^2/s)； μ 为换热介质的动力黏度 ($Pa \cdot s$)； C_p 为换热介质的比热容量 ($J/(kg \cdot K)$)。为了比较 CO_2 与水入渗岩石的影响，本文假设注入 CO_2 、水情况下初始裂隙的裂缝长度 L 、换热介质在裂隙中的稳定流速 u 相同。基于此再对式 (6) 进行变形，得到不同流体换热系数比值公式：

$$\eta_{i-j} = \frac{h_i}{h_j} = \left(\frac{K_i}{K_j} \right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\nu_j}{\nu_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu_i C_{p,i}}{\mu_j C_{p,j}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

式中： i 、 j 为角标，代表 $scCO_2$ 、 LCO_2 和水； η 为 i 、 j 两种换热介质的换热系数比值。

基于式 (6) (7) 可以求出不同初始状态下 $scCO_2$ 、 LCO_2 与水的换热系数比值，从而定性地分析裂纹扩张过程中不同流体对岩石的影响规律。根据 NIST 提供的 CO_2 和水的物性数据，假设流体初始状态压强为 10 MPa，不同初始温度下流体物性参数及换热系数比值见表 4。具体分析：当初始压强一定时，换热系数比值随温度增大不断减少，且 373.15 K 时， CO_2 处于超临界状态，此时 $scCO_2$ 的对流换热系数远远小于水做为换热介质时的数值。根据牛顿冷却定律的定义可知，不同物质之间交换相同热量时，对流换热系数与温差成反比关系。因

表 4 不同初始温度下对流换热系数对照表

Table 4 Convective heat transfer coefficient under different initial temperatures

流体类型	初始温度/K	初始压强/MPa	$K/(W/(m^2 \cdot K))$	$\nu/(m^2/s)$	$M/(Pa \cdot s)$	$C_p/(J/(kg \cdot K))$	η_{i-j}
水	10	10	0.585 0	1.292×10^{-6}	1.297×10^{-3}	4 159.2	
水	30	10	0.620 0	7.971×10^{-7}	7.971×10^{-4}	4 153.8	
水	60	10	0.656 0	4.744×10^{-7}	4.684×10^{-4}	4 163.6	
水	100	10	0.683 0	2.952×10^{-7}	2.843×10^{-4}	4 193.5	
LCO_2	10	10	0.109 0	1.054×10^{-7}	9.703×10^{-5}	2 338.6	0.129 6
LCO_2	30	10	0.084 7	8.565×10^{-8}	6.608×10^{-5}	3 260.1	0.086 3
$scCO_2$	60	10	0.039 3	8.223×10^{-8}	2.384×10^{-5}	3 032.8	0.018 8
$scCO_2$	100	10	0.031 3	1.156×10^{-7}	2.18×10^{-5}	1 521.8	0.007 9

注：表中 η_{i-j} 为 CO_2 比上对应温度下的水的换热系数比值。

此可知,在地层岩石初始温度、压强相同,交换相同的热量时, LCO₂、scCO₂ 作为换热介质会对岩石造成更大的温差 ΔT ,也就是说在岩石中会产生更大的热应力,其中换热方向为高温物体指向低温物体,岩石为高温物体向低温的换热介质传热,因此,岩石温度减小,热应力表现为拉应力。最终,根据式(2),CO₂ 作为换热介质有着更小的对流换热系数,温差变化更大, σ_T 更大,岩石更容易达到起裂平衡状态,宏观上表现为更多的裂隙生成,更低的破裂压力。这也证明了笔者在试验中观察到的现象。

5 结 论

本文对从福建漳州取来的花岗岩试样进行了 LCO₂、水入渗致裂试验:对比分析了试样的破裂特征,从换热角度解释了 CO₂ 对花岗岩破裂影响的作用机制。得到的主要结论如下:

(1) 分别对 LCO₂ 和水入渗致裂后的花岗岩破坏形态进行观察分析:水致裂后,形成一条沿径向贯穿,而竖向并没有扩展完全的裂纹;而 LCO₂ 致裂后,花岗岩试样会发生贯穿破坏,且会形成更多的破裂面。这说明随着致裂液黏度的减小,试样破坏过程就会形成数目更多且更加曲折的微裂纹分支,这意味着,采用 CO₂ 压裂可能更有利于形成缝网,而这有利于提高 EGS 工程效率。

(2) 破裂压随着致裂液黏度的减小而变小,这之前大量的关于试验和数值模拟方面的文献结论相符,并且 LCO₂、水入渗致裂时的破裂压与围压都是近似呈线性关系。因此,在实际工程环境中选取黏度小的 CO₂ 而不是水作为 EGS 工程中的致裂液会产生一个更小的井筒注入压力,这无疑会更加安全和节省能源。

(3) 本文完善了考虑岩石热应力的破裂压预测模型,对前人的研究进行了补充,并且此种情况更符合实际的 CO₂-EGS 工程。

(4) 从对流换热角度分析裂纹的扩展过程。相同条件下, LCO₂、scCO₂ 注入时换热系数远小于水注入的情况,此时,交换相同的热量,注 CO₂ 情况岩石会产生更大的温差,进而产生更大的热应力,岩石更容易达到起裂平衡状态,宏观上表现为更多的裂隙生成,更低的破裂压力,这也证明了作者在试验中观察到的现象。因此,CO₂ 相对于水更易于裂缝的扩展,进而影响着岩石的破裂特征。

这些结论都表明 EGS 工程中采用 CO₂ 作为致裂液,既可以维持较低的井筒注入压力,增加安全性和节省能源,又可以在地热层中形成更多的再生

裂纹,增加热交换效率。本文采用的是 LCO₂,为了更真实地模拟地层的真实环境,笔者会在将来开展更多的 scCO₂ 下的花岗岩入渗致裂试验。

参 考 文 献

- [1] BROWN DONALD W. A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water[C]//25th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. California: Stanford University, 2000.
- [2] MOHAN A R, TURAGA U, SHEMBEKAR V, et al. Utilization of carbon dioxide from coal-based power plants as a heat transfer fluid for electricity generation in enhanced geothermal system (EGS)[J]. *Energy*, 2013, 57(8): 505 - 512.
- [3] XU C, DOWD P, LI Q. Carbon sequestration potential of the Habanero reservoir when carbon dioxide is used as the heat exchange fluid[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(1): 50 - 59.
- [4] ISHIDA T, CHEN Q, MIZUTA Y. Effect of injected water on hydraulic fracturing deduced from acoustic emission monitoring[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1977, 150(3 - 4): 627 - 646.
- [5] ZOBACK M D, RUMMEL F, JUNG R, et al. Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Abstract*, 1977, 14(2): 49 - 58.
- [6] ZOBACK M D, POLLARD D D. Hydraulic fracture propagation and the interpretation of pressure-time records for in-situ stress determination[C]//Proceedings of 19th US Rock Mechanics Symposium. Reno: American Rock Mechanics Association, 1978.
- [7] OJALA IRA O. The effect of CO₂ on the mechanical properties of reservoir and caprock[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4(4): 5392 - 5397.
- [8] MARBLER HERWIG, ERICKSON KIRSTEN P, SCHMIDT MICHAEL, et al. Geomechanical and geochemical effects on sandstones caused by the reaction with supercritical CO₂: an experimental approach to in situ conditions in deep geological reservoirs[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 69(6): 1981 - 1998.
- [9] MORITA N, BLACK A D, FUH G F. Theory of lost circulation pressure[C]//Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: Spe Technical Conference & Exhibition, 1990.
- [10] OORT VAN E, RAZAVI S O. Wellbore strengthening and

- casing smear: the common underlying mechanism[C]// Drilling Conference and Exhibition. Fort Worth: Society of Petroleum Engineers, 2014.
- [11] HUBBERT M KING, WILLIS DAVID G. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. **Developments in Petroleum Science**, 1957, 210(7): 369 - 390.
- [12] HAIMSON B, FAIRHUST C. Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks[J]. **Society of Petroleum Engineers Journal**, 1967, 7(6): 310 - 318.
- [13] HAIMSON B, FAIRHURST C. Hydraulic fracturing in porous-permeable materials[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1969, 21(7): 811 - 817.
- [14] MORITA N, BLACK A D, FUH G F. Borehole breakdown pressure with drilling fluids—I. Empirical results[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1996, 33(1): 39 - 51.
- [15] HU SHAOBIN, LI XIAOCHUN, BAI BING. Effects of different fluids on microcrack propagation in sandstone under true triaxial loading conditions[J]. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, 2017, 8: 9 - 11.
- [16] LI Q, WU Z, LEI X, et al. Experimental and numerical study on the fracture of rocks during injection of CO₂-saturated water[J]. **Environmental Geology**, 2007, 51(7): 1157 - 1164.
- [17] LEI X L, NISHIZAWA O, XUE Z. Experimental study on the fractures of sandstone and andesite during injection of CO₂-saturated water by monitoring acoustic emission and velocity[C]//EGS-AGU-EUG Joint Assembly. [S. l.]: [s. n.], 2003.
- [18] ISHIDA T, CHEN Q, MIZUTA Y, et al. Influence of fluid viscosity on the hydraulic fracturing mechanism[J]. **Journal of Energy Resources Technology**, 2004, 126(3): 190 - 200.
- [19] ISHIDA T, AOYAGI K, NIWA T, et al. Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing laboratory experiment with supercritical and liquid CO₂[J]. **Geophysical Research Letters**, 2012, 39(16): 16309.
- [20] ISHIDA T, CHEN Y, BENNOUR Z, et al. Features of CO₂ fracturing deduced from acoustic emission and microscopy in laboratory experiments[J]. **Journal of Geophysical Research Solid Earth**, 2016, 11(121): 8080 - 8098.
- [21] CHEN YOUQING, NAGAYA Y, ISHIDA T. Observations of fractures induced by hydraulic fracturing in anisotropic granite[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2015, 48(4): 1455 - 1461.
- [22] BIENIAWSKI Z T, HAWKES I. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1978, 15(15): 99 - 103.
- [23] 李小春, 鲁建荣, 白冰, 等. 厚壁圆筒式两相流体致裂仪研制[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(8): 1537 - 1544.
- LI Xiao-chun, LU Jian-rong, BAI Bing, et al. Development of hollow-cylinder tensile tester in two-phase fluids[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(8): 1537 - 1544.
- [24] 刘明泽, 白冰, 李小春, 等. CO₂-水两相条件下砂岩致裂特征与有效应力模型的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2016, 35(2): 250 - 259.
- LIU Ming-ze, BAI Bing, LI Xiao-chun, et al. Experimental study of fracturing characteristics of sandstone under CO₂-water two-phase condition and effective stress model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(2): 250 - 259.
- [25] 马峰, 孙红丽, 蔺文静, 等. 中国 EGS 示范工程靶区选址与指标矩阵评价[J]. **科技导报**, 2015, 33(8): 41 - 47.
- MA Feng, SUN Hong-li, LIN Wen-jing, et al. Target site selection and index matrix evaluation of EGS trial project in China[J]. **Science & Technology Review**, 2015, 33(8): 41 - 47.
- [26] LEGUILLON D, QUESADA D, PUTOT C, et al. Prediction of crack initiation at blunt notches and cavities-size effects[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2007, 74(15): 2420 - 2436.
- [27] SCHMITT D R, ZOBACK M D. Poroelastic effects in the determination of the maximum horizontal principal stress in hydraulic fracturing tests a proposed breakdown equation employing a modified effective stress relation for tensile failure[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1989, 26(6): 499 - 506.
- [28] GARAGASH D, DETOURNAY E. An analysis of the influence of the pressurization rate on the borehole breakdown pressure[J]. **International Journal of Solids & Structures**, 1997, 34(24): 3099 - 3118.
- [29] ZHOU X, BURBEY T J. Fluid effect on hydraulic fracture propagation behavior: a comparison between water and supercritical CO₂-like fluid[J]. **Geofluids**, 2014, 14(2): 174 - 188.
- [30] WARPINSKI N R, KRAMM R C, HEINZE J R, et al. Comparison of single-and dual-array microseismic mapping techniques in the barnett shale[C]//2005 Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas: Spe Technical Conference & Exhibition, 2005.
- [31] CHAPMAN A J. Heat transfer[M]. New York: Macmilan Publishing Company, 1989.