

DOI: 10.11779/CJGE201809003

低渗储层砂岩渗流-应力-损伤渐裂过程的渗透特性演化研究

刘先珊^{1, 2}, 王科^{1, 2}, 许明^{1, 2}

(1. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 低渗储层采收率的准确评价是制定合理开发方案的重要理论基础, 有效揭示开采过程诱发岩体渐裂的渗透性演化机理至关重要。以低渗储层砂岩为研究对象, 分析不同荷载组合下岩体裂纹的发展规律, 研究渗流-应力-损伤破裂过程中渗透率与裂纹状态的关联特性。试验结果表明: 加载初期由于岩石内部孔隙及微裂隙的压密, 渗透率减小; 随着环向裂纹应变增大, 岩石内部裂纹开始稳定扩展, 渗透率缓慢增大, 随着荷载的增大, 裂纹加速扩展导致渗透率快速增大; 最后断裂面发生相对滑移, 岩石碎屑堵塞原有的渗流通道, 渗透率下降。基于试验结果, 运用理论方法研究不同荷载下的岩体损伤特征, 建立损伤变量与裂纹环向变形的关联性, 推导岩体渗透率与损伤变量的关系式, 描述岩体渗流-应力-损伤渐裂中的渗透特性, 揭示低渗储层砂岩的渗透率演化机理。其研究成果可为低渗砂岩储层开发过程的优化及产能预测提供新的研究思路和技术手段, 对确保石油工业的可持续发展具有重要的实践价值。

关键词: 低渗储层砂岩; 渗透率; 渗流-应力-损伤; 裂纹状态; 演化机理

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)09-1584-09

作者简介: 刘先珊(1978-), 女, 湖北荆州人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程渗流、多场耦合理论及数值方法等方面的研究与教学工作。E-mail: liuxianshan@163.com。

Permeability evolution of low-permeability reservoir sandstone considering hydraulic-mechanical-damage coupling effect during gradual fracturing process

LIU Xian-shan^{1, 2}, WANG Ke^{1, 2}, XU Ming^{1, 2}

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education,

Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The accurate assessment of the recovery ratio is significant for drawing up a rational development scheme, so it is significant to reveal the evolution mechanism of the rock permeability considering the progressive failure induced by the reservoir development. Taking the low-permeability reservoir sandstone as the case study, the variation of the rock cracks under different loading combinations is analyzed, and the correlation between the permeability rate and the cracks considering seepage-stress-damage coupling effect is also deeply investigated. According to the results, the permeability decreases at the first stage of loading due to the progressive compaction of the rock pores and small cracks. And then, the increasing hoopstrain results in a moderate increase of permeability due to the stable development of rock cracks, subsequently the increasing load induces the cracks to spread very fast so that the permeability quickly increases. Finally, the permeability gradually decreases because the relative sliding appears in the broken planes and the corresponding rock fragments block the original fluid channels. Based on the experiments, the characteristics of rock damage are analyzed using the theoretical methods, and the relation between the damage and the hoopstrain is described to derive the formula for the permeability and damage to explain the permeability variation. The evolution mechanism of the sandstone permeability is revealed clearly. The above achievements can be an important support for the development optimization and oil capacity prediction for the low-permeability reservoir, and they are also significant for the sustainable development of oil.

Key words: low-permeability reservoir sandstone; permeability rate; hydraulic-mechanical-damage; crack condition; evolution mechanism

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779021; 51478065)

收稿日期: 2017-06-02

*通讯作者 (E-mail: lzmoumou@163.com)

0 引言

《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》提出了重要目标“加强国内能源资源勘探开发, 着力增强能源供应能力, 到2020年, 能源自给能力保持在85%左右, 石油储采比提高到14~15%”。2016年的国土资源部报告数据显示石油对外依存度增至65%, 超国际警戒线15个百分点, 该年的石油新增探明地质储量约6.49亿吨, 以低渗砂岩储层为主。可见, 低渗储层作为石油工程领域面临的重要挑战, 合理有效的开发已势在必行。而低渗储层岩体具有孔隙半径小、喉道狭窄、微裂缝发育等特殊的物性特征, 开采过程的强扰动导致储层内流体压力改变, 其有效应力变化直接影响了岩石骨架及孔隙结构的重新构建, 进一步导致渗透率的显著非线性变化。因此, 渗透率作为评价储层开发效果的重要特征量, 如何准确描述低渗储层开发过程强扰动导致的砂岩渗透率演化机理是当前岩体力学领域亟待解决的关键课题。

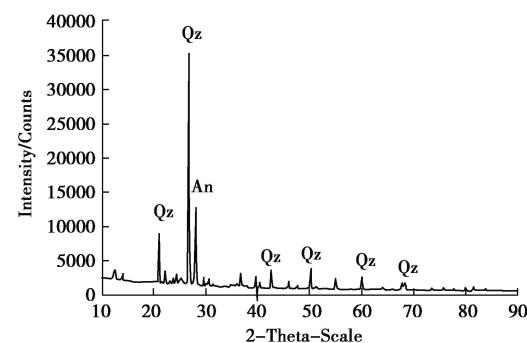
近年来, 较多学者对各类工程岩体在不同荷载组合下的渗透性进行了大量的试验及理论分析, 取得了较为丰富的研究成果。如王小江等^[1]、Tan等^[2]通过试验分析了渗透率与轴向应变的变化规律, 表明渗透率的演化过程与偏应力-应变演化同步; 王伟等^[3]、俞缙等^[4]、Yang等^[5]明确了岩体变形与渗透率的关联性, 表明渗透率对环向应变的改变更为敏感, 而体积应变对渗透率的影响相对较弱。以上试验表明了岩体渗透性与其结构改变密切相关, 阐明了渗透率随着围压增大而减小、随着渗透压增大而增大的变化规律。为了进一步描述复杂赋存环境中加卸载岩体渗透性的演化规律, 一些学者基于岩体损伤、破裂理论进行渗透率演化研究, 使得研究结果更具通用性及理论性。如胡少华等^[6]、陈亮等^[7]、王伟等^[8]运用损伤理论及细观力学方法揭示了渗透性的演化机理, 阐明渗透性的变化是由于岩体结构逐渐损伤破坏导致的; 俞缙^[9]等得出峰前和峰后卸围压时, 卸载前渗透规律与常规加载相同, 卸载后渗透率急剧增长, 增幅较大, 且峰前卸围压后的岩体渗透率增幅最大; 孔茜等^[10]、王伟等^[11]基于试验表明加卸载过程中的岩石渗透率曲线并不重合, 主要在加卸载过程中岩石产生了不可恢复的变形, 结构已发生显著的变化, 渗流通道改变, 不同应力路径下的渗透率就不同; 张振华等^[12]进行三峡库区红砂岩进行周期性渗透压试验, 表明4次加卸载渗透压后的砂岩渗透性呈稳定变化趋势。以上成果阐明了不同荷载组合下的岩体渗透性演化过程, 为岩体渗透性研究提供了可行的研究手段及重要的研究基础。

因此, 基于如上研究成果, 考虑低渗储层岩体渗透率^[13](约 $0.1 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)对油气采收率及产量的重要影响, 深入研究此类岩石渐裂过程中的渗透率演化机制意义显著。以低渗储层砂岩为研究对象, 基于室内试验, 强化外荷载与渗透压组合的低渗砂岩渗流-应力-损伤耦合效应, 建立岩石渐裂过程中渗透率与裂纹形态的关系曲线, 结合理论方法揭示岩石损伤渐裂诱发的渗透率演化机理。研究成果可为低渗砂岩储层的开发优化及产能预测提供新的技术手段, 对确保石油工业的可持续发展奠定基础。

1 低渗储层砂岩的渗透特性测试原理及方法

1.1 试样制备

试验砂岩岩样取自渝西新店子背斜西翼致密储层砂岩, 砂岩呈灰白色, 岩样粉碎后的XRD衍射图谱如图1(a)所示, 显示该岩样为长石类砂岩, 主要矿物为石英和长石(钙长石)。岩样层理明显, 为避免岩样不均性对试验结果的影响, 试验前对所有试件进行声波检测(RSM-SY5非金属声波检测仪, 如图1(b)), 声波检测均为 $2.3 \pm 0.1 \text{ km/s}$, 可认为该批次试件均质的。经过取芯、切割, 打磨成直径50 mm×高100 mm的柱状标准试件, 如图1(c)所示。



(a) 砂岩岩样粉末X射线衍射图



(b) 纵波检测图



(c) 砂岩岩样外观图

图1 岩样及试验设备

Fig. 1 Rock sample and experimental equipments

1.2 试验设备

系列试验均在重庆大学岩土试验中心进行, 采用

法国 TOP-INDUSTRIE 公司的多功能岩石三轴测试系统。该仪器最大轴向载荷为 1000 kN, 最大围压为 60 MPa, 最大渗透压为 60 MPa, 可测量轴向变形及环向变形。可进行常规单轴、三轴、岩石力学流变、岩石渗流应力耦合、温度条件下岩石力学等试验。可根据不同的试验需求选择合适的加载的方式。每 5 s 自动记录试验中的所有实时数据。

1.3 试验原理及方法

渗透率大于 $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 时可采用稳态法测试岩石渗透率。试验中通过测量一定时间内从泵流出的液体体积, 基于达西定律, 计算岩石在特定工况下不同时间段内的渗透率^[14]:

$$k = \frac{\mu L V}{A \Delta p \Delta t} \quad (1)$$

式中 k 为岩样的渗透率 (m^2); μ 为水的动力黏滞系数, 取 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (取温度 $T = 20^\circ\text{C}$ 的 μ 值); L 为岩石的高度 (m); V 为 Δt 时间段内渗流流体流入体积 (m^3); A 为岩样的横截面面积 (m^2); Δp 为岩样两端渗透压差 (Pa); Δt 为时间 (s)。

渗透试验前对试件进行饱水处理, 将试件放入压力容器内抽真空 4 h, 抽湿 4 h, 再放入蒸馏水中浸泡 16 h, 使试件空隙内充满水, 避免试验中因试件内部空隙未充满水而影响试验的准确性。该试验前通过饱水法测得岩样的有效孔隙率为 12.2%~13.1%。进行不同围压及渗透压组合的渗透试验: ①围压: 6, 15 MPa, 分别组合 3 组渗透压: 2, 3, 4 MPa; ②渗透压: 2 MPa, 对应 2 组围压 3, 9 MPa。为避免岩样的离散性, 相同工况下进行 3 个岩样试验。试验过程中: ①将饱水岩样装入围压室, 拧好螺栓, 围压室充油; ②将围压加载到预定值后, 将渗透压加载到预设值, 仪器内饱水 12 h; ③以 0.01 mm/min 的加载速率施加轴向位移载荷到试件破坏, 自动记录加载过程中的所有数据, 根据式 (1) 即可计算该段时间内岩石的渗透率, 获得渗透率演化曲线。

2 不同荷载组合的低渗砂岩渗透特性分析

2.1 不同围压下的岩样渗透率演化规律

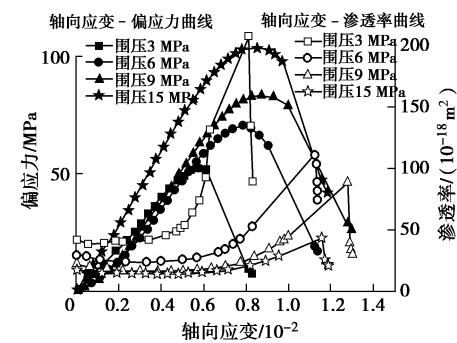
不同围压下岩样的初始渗透率、最小渗透率及最大渗透率如表 1 所示, 渗透演化曲线如图 2 所示。图 2 (a) 为渗透压 2 MPa 组合围压 3, 6, 9, 15 MPa 的应力-应变及渗透率演化曲线, 不同围压对应的初始渗透率分别为 84.94×10^{-18} , 59.82×10^{-18} , 44.12×10^{-18} 及 $35.46 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, 其结果表明: 初始压密阶段的岩样渗透率逐渐减小, 主要在于加轴压前围压已到预设值, 试样内的微孔隙和微裂隙在围压下逐渐闭合, 围

压越大, 其压密闭合程度越大, 岩样内部的渗流通道也较低围压的要少。还表明围压从 3 增到 6 MPa, 渗透率减小 29.6%; 6 增到 9 MPa, 渗透率减小 26.24%; 而从 9 增到 15 MPa, 围压增大了 6 MPa, 但渗透率却只减小了 19.63%, 说明较低围压下的岩样渗透率对围压较敏感。可见, 初始加载中岩石内部的微孔隙和微裂隙会在较小围压下产生较大的压密闭合, 当围压继续增大, 孔隙及裂隙的压密效应逐渐减弱, 渗透率减小的速率也变慢。因此, 同一渗透压下, 渗透率随着围压的增大而减小, 但随着围压的增大, 其减小的速率降低。

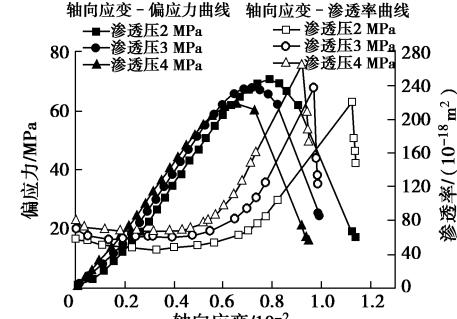
表 1 渗透压 2 MPa 组合不同围压的渗透率特征值

Table 1 Permeabilities considering hydraulic pressure of 2 MPa with different confining pressures (10^{-18} m^2)

围压/MPa	初始渗透率	最小渗透率	最大渗透率
3	84.94	76.76	414.62
6	59.82	47.32	220.52
9	44.12	32.68	176.96
15	35.46	29.20	74.90



(a) 渗透压 2 MPa 组合不同围压



(b) 围压 6 MPa 组合不同渗透压

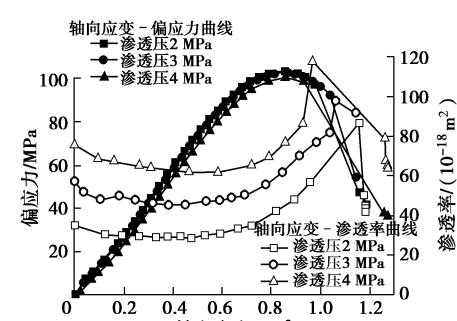


图 2 不同荷载组合的低渗岩样渗透性演化特征
Fig. 2 Permeability evolution under different loading combinations

同时, 研究了不同围压 3, 6, 9, 15 MPa 组合轴压的渗透率演化规律, 最小渗透率如表 1 所示, 最小渗透率对应的偏应力分别为 12.29, 26.51, 35.77, 61.64 MPa, 如图 2 (a) 所示。其结果表明, 最小渗透率随围压的增大而逐渐减小, 且减小的速率越来越慢, 而最小渗透率对应的偏应力随围压增大而增大; 且围压越大, 试样内的空隙和裂隙被压缩到最低程度需要更大的轴向荷载, 岩样压缩而不发生开裂的几率越大, 渗透率就越低; 据文献[14]可知起裂应力大约为岩石峰值强度的 25%~40%, 本试验的最小渗透率对应的偏应力数值与文献基本一致, 但围压 15 MPa 时最小渗透率对应的偏应力约为峰值强度 0.7, 主要在岩石初始饱和时的水软化作用, 降低了岩石的强度。另外, 不同围压对应的最大渗透率分别为 414.62×10^{-18} , 220.52×10^{-18} , 176.96×10^{-18} , $74.9 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, 最大渗透率也随围压增大而减小。由于最大渗透率发生在试件脆断之后, 断面间形成了极好的渗流通道, 渗透率明显增大, 但随着围压增大, 最大渗透率仍然呈减小的趋势。

以上不同围压下的岩样渗透率演化规律可知: 围压越大, 渗透率演化曲线越趋于平缓, 主要在围压越大, 孔隙和裂隙压密闭合越显著, 特别是轴压增大导致内部裂纹扩展愈发缓慢, 渗流通道减少且开度减小, 渗透率的变化越平缓。

2.2 不同渗透压下的渗透率演化规律

图 2 (b) 阐明了岩样 6 MPa 围压组合渗透压 2, 3, 4 MPa 后的渗透率演化特征, 3 种工况的岩样初始渗透率如表 2 所示, 均表明渗透率数值随着渗透压增大而增大。水压作用下岩石受到的有效应力减小, 岩样的变形相对减小, 相同围压下随着渗透压增大渗透率也增大。同时, 表 2 的结果还显示该条件下岩样的最小渗透率数值也是随渗透压增大而增大。可见, 渗透压大则曲线上升段的斜率更大, 此过程中裂纹处于不稳定发展状态, 高渗透压对岩石的劈裂效应越明显, 岩样内部的裂纹发育越快, 且裂纹开度增大效应越明显, 对应的渗透率也增大越快, 在曲线上表现为斜率越大。同时, 也得到了 6 MPa 围压组合渗透压 2, 3, 4 MPa 的岩样最大渗透率如表 2 所示, 其最大渗透率数值随着渗透压的增大而增大。同样表明随着渗透压的增大, 岩样受到的有效围压减小, 当试件发生脆断后, 围压对断裂面间的挤压作用减弱; 且渗透压会导致岩样脆断后的断裂面进一步扩展扩宽, 渗流路径越明显, 且渗透压越大断裂面的张开度也越显著, 岩样最大渗透率越大。

另外, 进一步构建了围压 15 MPa 组合渗透压 2, 3, 4 MPa 的渗透率演化曲线, 如图 2 (c)。对应条件

下初始渗透率如表 2 所示, 其数值的变化规律与围压 6 MPa 组合渗透压 2, 3, 4 MPa 的规律基本一致。只是围压越大, 岩样的压缩效应越明显, 各渗透率值较围压 6 MPa 条件下均有所减少, 渗透率的演化规律是符合实际情况的。

表 2 围压组合渗透压的渗透率特征值

Table 2 Permeabilities considering hydraulic pressure with different confining pressures (10^{-18} m^2)

围压/MPa	渗透压/MPa	初始渗透率	最小渗透率	最大渗透率
6	2	59.82	47.32	220.52
	3	73.66	58.02	236.94
	4	79.98	67.48	261.38
	2	36.22	24.98	74.90
15	3	57.22	45.52	109.74
	4	75.94	61.94	119.56

3 低渗透层砂岩的渗透性演化机理

3.1 裂纹扩展过程中的渗透率演化特性

根据试验获得表征三轴压缩条件下岩样内部裂隙发展的偏应力-应变曲线, 如图 3 (a) 所示, 描述了各阶段岩石内部结构的演化情况。如图 3 可见, 其演化过程大致为 5 个阶段: ①压密阶段: 岩石内部的初始微裂隙和孔隙在轴压作用下被压密, 少有新的裂纹和裂隙产生; ②线弹性阶段: 应力-应变曲线近似一条直线; ③裂纹稳定发展阶段: 当偏应力大于起裂应力 (σ_{ci}) 时, 开始出现新裂纹, 随着轴压的增加裂纹稳定发展; ④裂纹不稳定发展阶段: 当轴压大于损伤应力 (σ_{cd}) 时, 岩石内部的裂隙快速发展, 汇合、贯通, 最终形成宏观断裂面; ⑤峰后塑性残余变形阶段: 岩石内部所积累的能量随着岩石的断裂而得到释放。可见, 加载过程中各阶段岩石内部裂纹的分布情况显著改变。

结合图 3 (a) 的渗透率演化曲线, 第一和第二阶段的渗透率减小, 主要在岩石内部的初始孔隙和裂隙在轴压下逐渐被压密, 渗流通道变窄或者减少; 第三阶段内当应力达到起裂应力, 裂纹产生并缓慢发展, 渗透率开始缓慢增大, 随着轴压的继续增大, 裂纹稳定发展, 渗透率持续缓慢上升; 第四阶段内应力达到损伤应力后, 岩石内部的裂纹持续增加, 裂纹汇合并贯通, 此阶段的渗流通道快速增多, 渗流通道扩宽且加速发展, 渗透率急剧上升; 且岩石发生脆断后, 由于位移加载方式使得两个断裂面未完全被压密, 流体在渗透压作用下快速进入破裂面, 渗透率达到最大值; 第五阶段, 岩石内部所积累的能量随着岩石的断裂而得到释放, 继续施加的轴向位移载荷使得破裂面间的开度减小, 渗透率下降, 加之断裂面在位移载荷的继续作用下发生相对滑动, 岩石碎屑堵塞原有的渗流通道, 岩石的渗透率持续下降。图 3 (b)~3 (g)

均描述了不同裂纹扩展过程中的渗透率演化特征,深入阐明了荷载作用下岩石内部裂纹扩展对渗透率的关键影响作用,渗透率的演化规律可在一定程度上通过裂纹的变化来表征,这与文献[15]的试验结论是一致的。

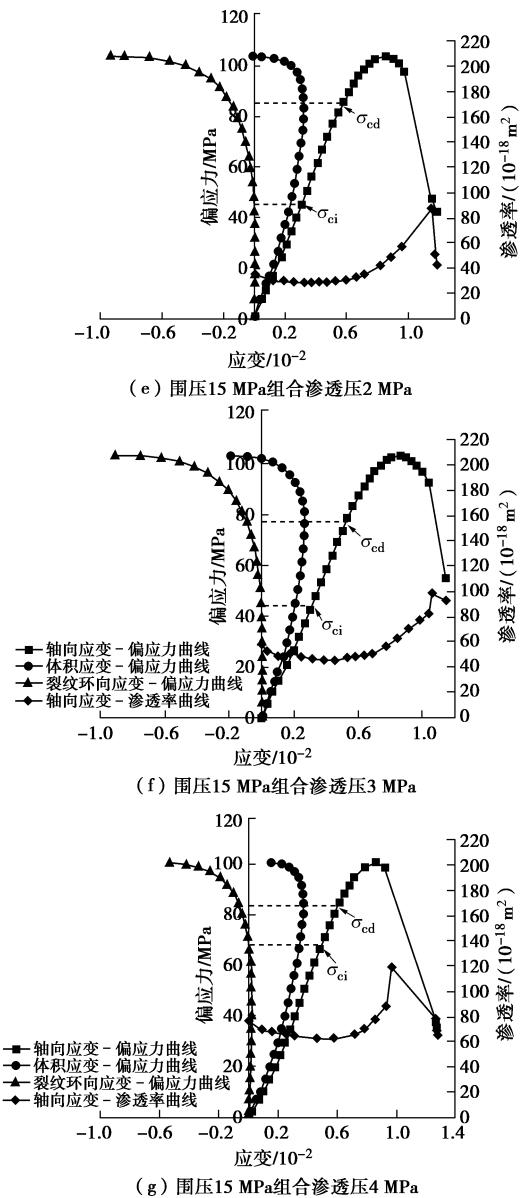
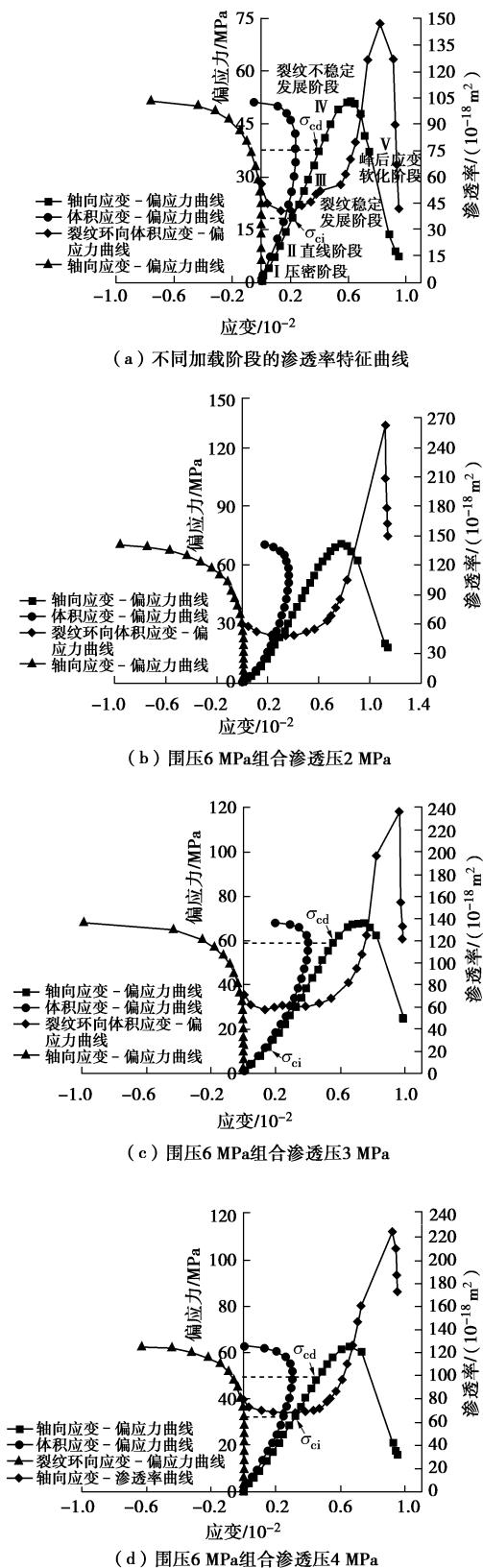


图 3 不同围压组合渗透压的岩样力学响应及渗透率演化特征

Fig. 3 Mechanical response and permeability evolution considering different confining pressures

3.2 裂纹环向应变表征的岩样渗透率演化特性

渗透率与轴向应变的关联曲线在一定程度上反映了裂纹扩展过程中的渗透性演化规律。文献[16]阐明环向应变可以描述岩样内部竖向裂纹的数量及裂纹张开度的变化情况。因此,建立裂纹环向应变与轴向应变、渗透率间的相互关联性,揭示荷载作用下岩样的渗透率演化机理。根据获得的环向应变及轴向应变,得到三轴压缩岩石的体积应变:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad , \quad (2)$$

式中, ε_v 为体积应变, ε_1 , ε_3 分别为轴向和环向应变。环向应变可表示为

$$\varepsilon_3 = 2\varepsilon_{e3} + \varepsilon_{c3} \quad , \quad (3)$$

式中, ε_{e3} 为弹性环向应变, ε_{c3} 为裂纹环向应变。根

据广义虎克定律可得弹性环向应变为

$$\varepsilon_{c3} = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)], \quad (4)$$

式中, σ_1 为轴压, σ_2 , σ_3 为围压。

如图 4 所示, 加载初期的原始裂纹处于压密阶段, 没有新裂纹产生和裂纹扩展, 裂纹环向应变 ε_{c3} 近似为零, 偏应力-裂纹环向应变曲线近似直线; 当裂纹环向应变开始增大时, 表示岩样内部产生新裂纹, 对应起裂应力 (σ_{ci}), 此时岩石内部的微裂纹开始产生并扩展。因此, 初始阶段虽然逐渐施加了轴向位移, 但较小的轴向载荷不足以导致竖向裂纹状态或者数量发生变化, 对应的裂纹环向应变几乎为零, 渗透率逐渐减小。随着轴向载荷的增加, 横向裂纹被压缩到最小, 渗透率最小。当轴向载荷继续增大, 竖向裂纹开始扩容, 出现新的裂纹或初始裂纹开度增大, 裂纹环向应变开始缓慢增大, 渗透率随之缓慢增加。当轴向载荷再增大, 竖向裂纹增长速率越来越快, 渗透率增大的速率也随之增大。岩样发生脆断后, 裂纹环向应变也快速变化, 渗透率达到最大。鉴于渗透率演化与竖向裂纹变化的直接关联性, 间接反映竖向裂纹变化特性的裂纹环向应变可以有效表征岩石渗透率的演化机理。

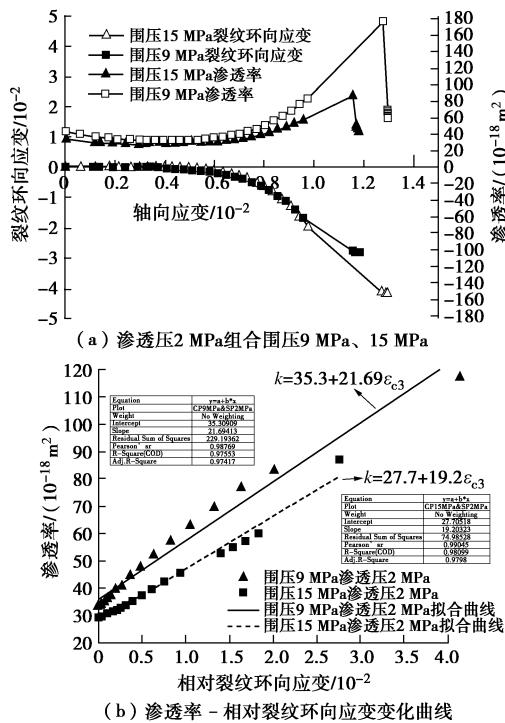


图 4 不同荷载下的渗透率与裂纹环向应变的特征

Fig. 4 Permeability vs. circumferential strain of cracks considering different loading conditions

图 4 (a) 阐明了围压 9 MPa 组合渗透压 2 MPa 的裂纹环向应变与渗透率的关联性。表明初始压密阶段裂纹环向应变几乎为零, 上升段近似为直线, 横向

和斜向裂纹被压密, 岩样的渗透率从最初 44.62×10^{-18} 减少至 32.68×10^{-18} m², 而裂纹环向应变从 0 增大至 0.006825×10^{-2} 再减小到 0, 几乎没有变化; 随着轴向载荷增大, 裂纹环向应变缓慢增大, 裂纹环向应变从 0 增大至 -0.07×10^{-2} , 渗透率随之缓慢增加, 从 32.68×10^{-18} 增大至 34.6×10^{-18} m²; 此后, 随着轴向载荷的继续增大, 裂纹环向应变从 -0.07×10^{-2} 快速增大至 -4.14×10^{-2} , 渗透率增大至 176.96×10^{-18} m²。且给出了围压 15 MPa 组合渗透压 2 MPa 的裂纹环向应变与渗透率的关联曲线, 同样具有如上的变化规律。比较两种工况可知: 同渗透压下, 围压越大, 产生裂纹环向应变对应的偏应力越大, 且后续裂纹环向应变的变化速率越快; 且围压越大, 岩样在加载过程中内部积累的能量越多, 一旦能量释放越快, 就将导致起裂后裂纹环向应变的变化速率越快。如上结果较好地反映了岩样脆断前的渗透性-裂纹环向应变变化规律。

如图 4 (b) 所示的裂纹环向应变与渗透率的拟合曲线, 围压 9 MPa 组合渗透压 2 MPa 的拟合曲线在渗透率上升阶段具有很好的线性关系, 相关系数 0.977; 围压 15 MPa 组合渗透压 2 MPa 的拟合曲线再次出现线性关系, 相关系数 0.985, 进一步说明裂纹环向变形过程可有效表征渗透率的演化特征。

3.3 岩样内部损伤表征的渗透率演化特性

以上研究成果表明, 由于岩样内部孔隙、微裂纹在赋存环境中的不断劣化^[18], 形成了渗流-应力-损伤耦合的岩样渐裂过程, 其渗透性也随之变化。为了进一步阐明裂纹扩展对渗透率的关键影响^[19], 引入损伤变量 D ^[6, 18], 研究岩石损伤渐裂过程中的渗透率演化机理。假定岩石微元强度服从 Weibull 随机分布, 损伤变量 D 为

$$D = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right]. \quad (5)$$

式中 m , F_0 为 Weibull 分布参数; F 为岩石微元强度随机分布变量。

建立三轴压缩下考虑渗透压力的岩石统计损伤本构模型:

$$\sigma_{lt} = [E\varepsilon_{lt} + (1-2\mu)(\sigma_3 - p_w)] \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] + (2\mu - 1)(\sigma_3 - p_w), \quad (6)$$

$$F = \frac{[E\varepsilon_{lt} + (1-2\mu)(\sigma_3 - p_w)]}{\sigma_{lt} + (1-2\mu)(\sigma_3 - p_w)}.$$

$$\left[\frac{\sin \varphi (\sigma_{lt} + 3\sigma_3 - 3p_w)}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}} + \frac{\sigma_{lt}}{\sqrt{3}} \right]. \quad (7)$$

式中 E 为弹性模量; ε_{lt} 为偏应变; ν 为岩石材料的泊松比, 取 0.19; σ_{lt} 为偏应力; σ_3 为围压; p_w 为渗透压; φ 为岩石的内摩擦角, 取 43.075° 。

可见, Weibull 的分布参数 m , F_0 的计算是关键, 本文采用线性拟合法将式 (4) 进行变换:

$$Y = mX - B \quad (8)$$

式中, $X = \ln F$; $Y = \ln \left\{ \ln \left[\frac{E\varepsilon_{lt} + (1-2\mu)(\sigma_3 - p_w)}{\sigma_{lt} + (1-2\mu)(\sigma_3 - p_w)} \right] \right\}$,

根据 X 和 Y 值的拟合, 得到参数 m 和 B , 求得

$$F_0 = \exp(B/m) \quad (9)$$

即可计算得到不同工况下损伤变量与轴向应变、渗透率的演化曲线, 如图 5 (a) ~ (c) 所示。其结果表明: 初始阶段损伤变量一直缓慢增加, 此阶段产生新的裂纹或裂隙, 但裂纹密度较小, 裂纹与裂纹间未联通, 轴向加载后岩样原有裂纹和裂隙压缩闭合, 渗透率下降, 但损伤却不断增大。因此, 损伤变量的变化速率可间接体现渗透率的变化。相同围压下, 损伤变量及渗透率的变化速率均随渗透压的增大而增大; 相同渗透压下, 损伤变量与渗透率的变化速率均随围压增大而减小。阐明了损伤变量的变化速率间接反映了内部裂纹和裂隙的发展快慢, 而岩石渗透率的变化与其内部裂纹和裂隙的发展密切相关, 因此试样内部的损伤速率越快, 试样渗透率的变化速率越快。

为了深入探究岩样损伤诱发裂纹开展导致渗透率演化的过程, 根据 3.2 节裂纹环向应变的推导, 可知岩石内部损伤可通过试验中获得的裂纹环向应变来表征。根据试验数据, 推导损伤变量与裂纹环向应变关系:

$$D = \ln(a + b * \varepsilon_{c3}) \quad (10)$$

式中, D 为损伤变量; a , b 为拟合参数, 可通过试验得到。

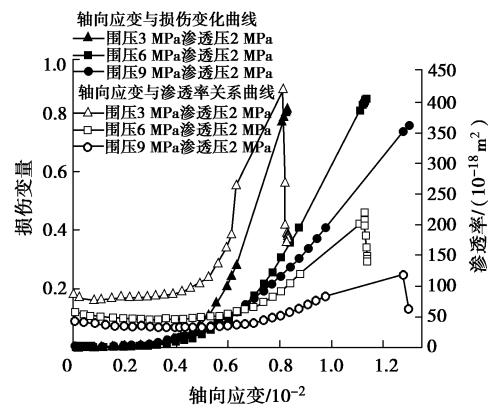
式 (10) 损伤变量的另一种表征形式, 为试验中的岩石渗透率演化机理研究提供了新的思路。

图 5 (d) 的 $D - \varepsilon_{c3}$ 曲线及对应工况的表达式, 表明: 岩样脆断前, 损伤变量与裂纹环向应变呈对数关系, 相关系数 R^2 大于 0.95, 阐明了裂纹环向应变可以表征岩石内部的损伤, 可进一步建立渗透率与损伤变量的关联性。根据围压 6 MPa 组合渗透压 2, 3, 4 MPa 的试验数据, 计算得到岩石渗透率与损伤变量的表达式:

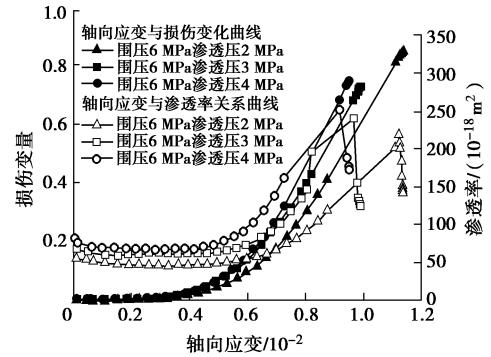
$$K = \zeta \exp(a + bD + cD^2) \quad (11)$$

式中 K 为渗透率; ζ 为渗透率的数量级 (10^{-18}); D 为损伤变量; a , b , c 为拟合参数, 由试验得到。为了验证拟合公式的适用性, 验证渗透压 2 MPa 组合围压 3, 6, 9 MPa 的试验数据, 其结果均符合式 (11)。

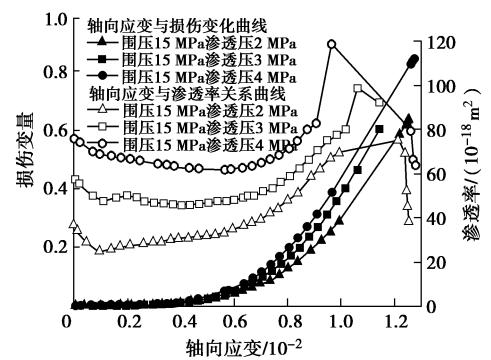
图 5 (e)、5 (f) 的结果表明, 渗透率的上升阶段与其内部所积累的损伤具有指数函数关系, 相关系数 R^2 均大于 0.95, 甚至达到了 0.99。进一步阐明了裂纹环向应变可表征岩石损伤, 而累积损伤是渗透率演化的重要标志, 由此揭示了渗透率随岩石内部损伤的演化规律。



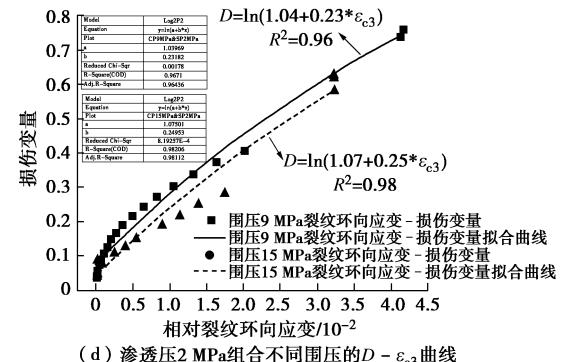
(a) 渗透压 2 MPa 组合不同围压



(b) 围压 6 MPa 组合不同渗透压



(c) 围压 15 MPa 组合不同渗透压



(d) 渗透压 2 MPa 组合不同围压的 $D - \varepsilon_{c3}$ 曲线

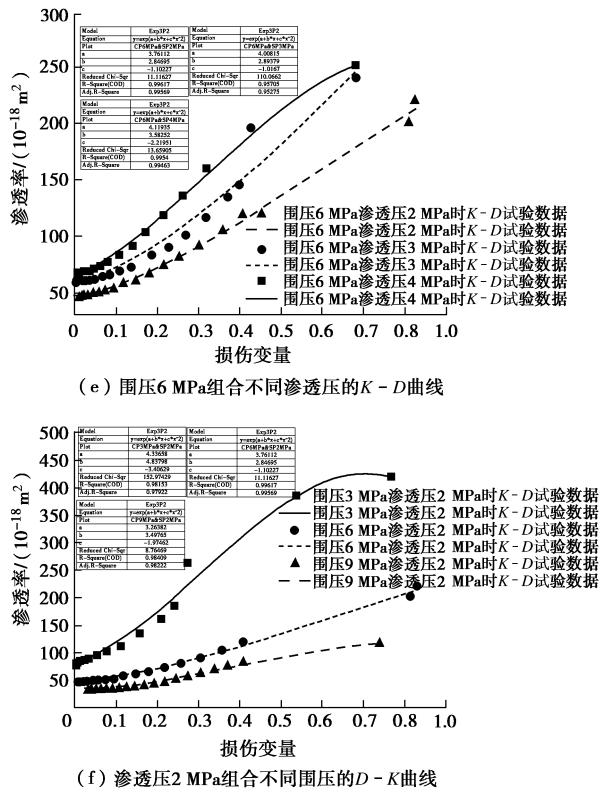


图5 渗流-应力-损伤的渗透率与损伤变量的关联特征

Fig. 5 Relationship between permeability and damage variation considering hydraulic-mechanical-damage effect

对于渗透率的下降阶段, 宏观破裂面的开度在轴向荷载下减小, 且破裂面相对滑动, 原有的渗流通道被岩屑堵塞, 渗透率降低, 但岩石内部损伤积累程度依然增大, 损伤变量继续增加。进一步揭示了低渗储层砂岩渗流-应力-损伤渐裂过程中的渗透性演化机理。

4 结 论

通过试验得到了不同荷载组合下的渗透率变化规律, 进一步研究裂纹扩展对应的渗透率演化特性。提出基于岩石结构损伤的渗透特性演化分析方法, 阐明岩石渗透率随荷载组合诱发结构损伤的动态变化规律, 得到以下3点结论。

(1) 不同荷载组合下低渗砂岩的渗透率演化试验结果表明: 渗透率随围压的增大而减小, 说明增大围压导致岩石孔隙及微裂隙压密闭合效应显著, 渗流通道明显减少; 随渗透压增大而增大, 说明渗透压的增大导致有效围压减小, 渗流通道连通效应显著, 表明渗流通道的开展及有效连通是渗透率大小控制的重要表征。试验还表明不同工况的岩石初始渗透率、最小渗透率、最大渗透率也具有如上类似的演化规律。

(2) 研究裂纹扩展过程与渗透率的关联性, 表明不同阶段荷载诱导的裂纹扩展效应不同, 渗透率表

现不同的演化特征; 引入裂纹环向应变能更准确描述岩样内部竖向裂纹数量和裂纹张开度的变化规律, 阐明了裂纹扩展对岩石渗透率的关键影响, 进一步揭示了荷载作用下低渗储层砂岩的渗透特性演化机理。

(3) 不同荷载组合诱发砂岩内部裂纹扩展导致渗流通道不断演化, 提出基于渗流-应力-损伤耦合效应的岩样渐裂分析方法, 建立损伤与环向裂纹应变的表征关系, 推导渗透率与损伤变量的关联曲线, 进一步揭示了荷载诱发岩样渐裂过程的渗透率演化机理, 为储层采收率评价及开发方案的制定提供理论依据。

参 考 文 献:

- [1] 王小江, 荣冠, 周创兵. 粗砂岩变形破坏过程中渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 2940 - 2947. (WANG Xiao-jiang, RONG Guan, ZHOU Chuang-bin. Permeability experimental study of gritstone in deformation and failure processes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2940 - 2947. (in Chinese))
- [2] TAN X, KONIETZKY H, FRÜHWIRT T. Laboratory observation and numerical simulation of permeability evolution during progressive failure of brittle rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 68: 167 - 176.
- [3] 王伟, 徐卫亚, 王如宾, 等. 低渗透岩石三轴压缩过程中的渗透性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 40 - 47. (WANG Wei, XU Wei-ya, WANG Ru-bin, et al. Permeability of dense rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 40 - 47. (in Chinese))
- [4] 俞缙, 李宏, 陈旭, 等. 渗透压-应力耦合作用下砂岩渗透率与变形关联性三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1203 - 1213. (YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Triaxial experimental study on sandstone of the permeability-strain relationship under coupling effects of seepage and stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1203 - 1213. (in Chinese))
- [5] YANG S Q, HUANG Y H, JIAO Y Y, et al. An experimental study on seepage behavior of sandstone material with different gas pressures[J]. Acta Mech Sin, 2015, 31(6): 837 - 844.
- [6] 胡少华, 陈益峰, 周创兵. 北山花岗岩渗透特性试验研究与细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2200 - 2209. (HU Shao-hua, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. Laboratory test and mesomechanical analysis

- of permeability variation of Beishan granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(11): 2200 - 2209. (in Chinese))
- [7] 陈亮, 王春萍, 刘健锋, 等. 压缩应力条件下花岗岩损伤演化特征及其对渗透性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(2): 287 - 295. (CHEN Liang, WANG Chun-ping, LIU Jian-feng, et al. Investigation on evolution characteristics of granite under compressive stress condition and its impact on permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(2): 287 - 295. (in Chinese))
- [8] 王伟, 李雪浩, 胡大伟, 等. 脆性岩石三轴压缩渐裂过程中的渗透性演化规律研究[J]. 岩土力学, 2016(10): 2761 - 2768. (WANG Wei, LI Xue-hao, HU Da-wei, et al. Permeability evolution of brittle rock in progressive failure process under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(10): 2761 - 2768. (in Chinese))
- [9] 俞缙, 李宏, 陈旭, 等. 砂岩卸围压变形过程中渗透性与声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 69 - 79. (YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Experimental study on permeability and acoustic emission characteristics of sandstone during processes of unloading confining pressure and deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 69 - 79. (in Chinese))
- [10] 孔茜, 王环玲, 徐卫亚. 循环加卸载作用下砂岩孔隙度与渗透率演化规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(10): 1893 - 1900. (KONG Qian, WANG Huang-ling, XU Wei-ya. Experimental investigation on relationship between porosity and permeability of sandstone under cyclic loading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(10): 1893 - 1900. (in Chinese))
- [11] 王伟, 徐卫亚, 郑志, 等. 不同应力路径下花岗片麻岩渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(2): 260 - 267. (WANG Wei, XU Wei-ya, ZHENG Zhi, et al. Experimental study of permeability properties of granitic gneiss under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(2): 260 - 267. (in Chinese))
- [12] 张振华, 孙钱程, 李德忠, 等. 周期性渗透压作用下红砂岩渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(5): 937 - 943. (ZHANG Zhen-hua, SUN Qian-cheng, LI De-zhong, et al. Experimental study on permeability characteristics of red sandstone under cyclic seepage pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **37**(5): 937 - 943. (in Chinese))
- [13] 闵琪, 金贵孝, 荣春龙. 低渗透油气田研究与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 1 - 5. (MIN Qi, JIN Gui-xiao, RONG Chun-long. Studies and practices on low permeability oil and gas field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 1 - 5. (in Chinese))
- [14] HEILAND J. Laboratory testing of coupled hydro-mechanical processes during rock deformation[J]. Hydrogeol Journal, 2003, **11**(1): 122 - 141.
- [15] 朱泽奇, 盛谦, 冷先伦, 等. 三峡花岗岩起裂机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(12): 2570 - 2575. (ZHU Ze-qi, SHENG Qian, LENG Xian-lun, et al. Study of crack initiation mechanism of three gorges granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(12): 2570 - 2575. (in Chinese))
- [16] FRENCH M E, CHESTER F M, CHESTER J S, et al. Stress-dependent transport properties of fractured arkosic sandstone[J]. Geofluids, 2016, **16**(3): 533 - 551.
- [17] XU P, YANG S Q. Permeability evolution of sandstone under short-term and long-term triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, **85**: 152 - 164.
- [18] 王伟, 田振元, 朱其志, 等. 考虑孔隙水压力的岩石统计损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 2): 3676 - 3682. (WANG Wei, TIAN Zhen-yuan, ZHU Qi-zhi, et al. Study of statistical damage constitutive model for rock considering pore water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S2): 3676 - 3682. (in Chinese))
- [19] GAO C, XIE L Z, XIE H P, et al. Coupling between the statistical damage model and permeability variation in reservoir sandstone: theoretical analysis and verification[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, **37**: 375 - 385.