

井内液柱压力对井壁稳定性的影响

马赵飞¹, 凌雪^{1,2}, 柳洪杰¹, 刘子晨¹, 梁高³

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 煤矿开采注浆技术创新基地, 北京 100040;

3. 海南海大工程检测科技有限公司, 海南海口 570228)

摘要:为探究液柱压力对井壁稳定性的影响,研究井壁围岩在井内液柱压力及地应力作用下的受力特征及裂纹扩展模式,采用三轴围压水压试验的方法,改变围压以及井内水压的方式对细砂岩进行室内试验,并通过CT扫描的方法进行内部裂纹观察。研究表明:(1)围压一定时,细砂岩的偏应力-应变曲线的各阶段变化趋势受孔内水压的影响较大,且峰值强度、残余强度、轴向峰值应变与围压、孔内水压均呈正相关。孔内水压的作用延缓了细砂岩的压缩屈服阶段受力破坏的过程,增加了细砂岩的延性破裂程度。(2)CT扫描发现一定围压作用下,细砂岩的主剪切破裂面与轴向的夹角呈现出随着水压的增大而减小的规律,且剪切裂纹轨迹由岩样外侧逐渐向中心孔壁靠近偏转;(3)随着水压的增加,孔内岩块塌落方式由集中塌落转变为零散塌落;水压越大,孔内的岩块塌落面积和塌落度越小。提升水压到合适强度,可以提升井壁稳定性,减小井壁失稳发生的可能。

关键词:井壁稳定性;细砂岩;孔内水压;三轴实验;CT扫描;力学性能;裂纹扩展

中图分类号:P634;TE24 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0143-06

Influence of liquid column pressure on well bore stability

MA Zhao-fei¹, LING Xue^{1,2}, LIU Hong-jie¹, LIU Zhi-chen¹, LIANG Gao³

(1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Coal Mine Grouting Technology Innovation Base, Beijing 100040, China;

3. Hainan Haida Engineering Testing Technology Co. LTD, Haikou Hainan 570228, China)

Abstract: In order to explore the influence of the liquid column pressure on the stability of borehole, study the stress characteristics and crack propagation mode of the surrounding rock under the action of the liquid column pressure in the borehole and the ground stress, the triaxial confining pressure hydraulic test method is adopted to carry out the laboratory test on the packsand by changing the confining pressure and the water pressure in the borehole, and the inner observation of the packsand is carried out by CT scanning method. The results show that: (1) when the confining pressure is constant, the variation trend of deviatorial-strain curve of packsand at each stage is greatly affected by bore water pressure, and the peak strength, residual strength and axial peak strain are positively correlated with confining pressure and bore water pressure. The action of water pressure in the pore delays the process of mechanical failure in the compressive yield stage of packsand and increases the degree of ductile fracture of packsand. (2) CT scan shows that under certain confining pressure, the angle between the principal shear fracture plane and the axial direction of the packsand decreases with the increase of the water pressure in the pore, and the shear crack track gradually deflects from the outside of the rock sample to the central pore wall. With the increase of water pressure in the hole, the collapse mode of rock block in the hole wall changes from centralized collapse to scattered collapse. The larger the water pressure in the hole, the smaller the collapse area and collapse degree of the rock in the hole wall. (3) Increasing water pressure can improve the stability of borehole and reduce the possibility of borehole instability.

收稿日期:2023-05-31; 修回日期:2023-08-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.021

基金项目:国家自然科学基金面上项目“浅层水力裂纹扩展和闭合的非线性流-固耦合规律研究”(编号:12172339);科学技术部国际科技合作专项项目“井下闭环高精度导向钻进技术”(编号:2006DFB21300)

第一作者:马赵飞,男,汉族,1997年生,硕士研究生,地质工程专业,北京市海淀区学院路29号,cumtmzf@163.com。

引用格式:马赵飞,凌雪,柳洪杰,等.井内液柱压力对井壁稳定性的影响[J].钻探工程,2023,50(S1):143-148.

MA Zhao-fei, LING Xue, LIU Hong-jie, et al. Influence of liquid column pressure on well bore stability[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):143-148.

Keywords: borehole wall stability; packsand; liquid column pressure; triaxial experiment; CT scan; mechanical property; crack extension

0 引言

随着石油资源开采的步伐不断加快,钻井工程中遇到的地层越来越复杂。复杂地层井壁失稳易造成井壁垮塌、卡钻等井下复杂情况和事故,严重制约了油气勘探开发的效果^[1]。井壁失稳影响钻井的工期,还给后期钻井施工带来严重影响^[2]。井壁失稳问题占全部钻井事故的90%以上^[3],因此研究钻井井壁失稳问题具有重要意义。

针对井壁围岩破裂导致钻井井壁失稳的问题,国内外学者进行了大量理论以及实验研究。胡小荣等^[4]基于三剪统一强度准则,推出了岩石的压剪裂纹断裂判据。张国军等^[5]基于摩尔-库伦准则对岩石材料在不同状态下的加卸载过程进行了分析,并总结了其对应的临界破坏方程。Furui等^[6]通过实验研究和解析及数值模拟方法建立了钻孔的稳定性综合模型。丁卫华等^[7]对三轴围压实验下的岩石试件进行CT扫描,分析了其裂纹状态的演化过程;件彦卿等^[8]对软硬两种砂岩进行单轴加载试验,并对岩石CT图像进行分析处理,以此研究岩石破坏过程中起关键作用的小裂纹的扩展规律。刘维国等^[9]对石灰岩进行了三轴围压实验,提出了裂纹稳定性传播阶段与裂纹的非稳定性传播阶段分界的特征。宫凤强等^[10]、张国凯等^[11]、张晓平等^[12]分别对砂岩进行了压缩实验并分析了力学性能以及裂纹扩展变化。三轴水压-围压实验方面,Wu等^[13]进行了含孔砂岩围压压缩实验,对砂岩受内外压作用下界面裂纹扩展进行了定性分析。Martin等^[14]研究了花岗岩的裂纹扩展过程。Zhang等^[15]、Lin等^[16]和Song等^[17]通过三轴围压实验及数字图像技术,研究分析了在不同加载实验条件下,红砂岩的损伤和裂纹变化规律。Wang等^[18]依托X射线及CT深入研究了岩石在三轴实验中,围压对岩石的结构变化及裂纹扩展影响规律。Wang等^[19]根据声发射定位技术对岩石裂纹动态演化及损伤断裂机理进行了研究。

前人对井壁失稳问题的实验研究大多是从单轴、三轴围压加载等实验角度出发,针对井内水压与围压关系的研究不多。实际钻井过程中,钻井液及地应力不是稳定状态,为了模拟实际钻井过程中,由

井内水压对井壁稳定性所带来的影响,进一步研究井壁围岩在内外压作用下的受力特征及破坏模式,本文利用三轴围压水压试验得到孔内液柱压力对细砂岩力学性质的影响,并通过CT扫描分析岩石破裂的裂纹扩展形式,从而进一步理解井内液柱压力与井壁稳定性的相互关系。

1 试样制备及测试方案

1.1 试样制备

试样为山西晋兴斜沟煤矿的细砂岩,主要成分时石英、高岭石、伊利石等。现场钻孔取心后按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266—99)^[20]加工精度要求进行加工,试样直径为50 mm,高度为100 mm,中心孔为直径5 mm、高100 mm(见图1)。岩样均为风干状态。



图1 细砂岩试样

1.2 试验仪器

试验使用ZYSS2000型岩石高温高压蠕变仪,见图2。仪器最大加载100 MPa,径向变形测量范围0~2.5 mm,精度 $\pm 0.5\%$,孔隙水压力范围0~30 MPa,孔隙水流量精度 $\pm 2\%$ 。

1.3 试验方案

三轴围压水压试验方案见表1。试样安装见图3,为排除温度影响,试验在室温20℃进行,加载前采用轴压2 kN固定岩样,围压加载速率0.05 MPa/s加载至目标值后进行孔内水压的加载,加载速度为0.02 MPa/s,待加载至目标值后,以0.005 mm/s速率加载轴压直至试样破坏,记录数据,包括各条件下的力位移曲线、峰值强度和残余强度以及弹性模量



图 2 ZYSS2000型三轴试验装置组成

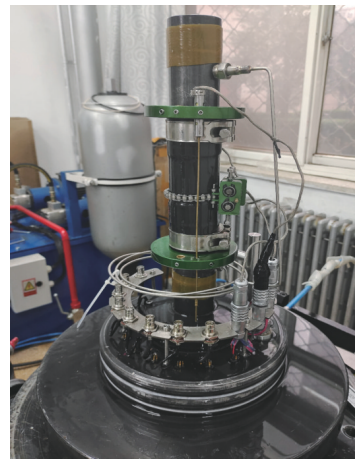


图 3 试样安装

等数据,并绘制相应曲线。

表 1 三轴压缩试验方案

试验编号	围压/MPa	水压/MPa
1	5	0
		0.5
		1
		2
		0
2	10	0.5
		1
		2
		0
		0.5
3	15	0
		0.5
		1
		2
		0

2 试验结果及分析

2.1 偏应力应变曲线

2.1.1 同等围压作用不同水压下偏应力应变曲线

围压一定时,偏应力应变曲线的变化趋势与水

压不同有关系,见图4。压缩破坏过程可以分为5个阶段,分别是裂纹压密段、弹性段、屈服扩展段、应变软化段、峰后残余稳定段。

在 5、10 和 15 MPa 的围压条件下,偏应力应变曲线的增长趋势表现基本一致。在围压一定时,水压由 0 增加到 2 MPa,曲线在压密阶段增长缓慢,弹性阶段增长快速,进入屈服阶段表现为脆性断裂,应变软化具有突然性,峰后残余阶段保持时间较长。随着水压增大,压密阶段时间增加,由压密阶段进入弹性阶段的时间增加,说明水压缓慢渗透进入孔壁,使得细砂岩内部的颗粒结构受力发生变化,孔内水逐渐填入岩石颗粒缝隙,使得在受压条件下,压密阶段时间延长,进入弹性阶段的时间延后,屈服扩展阶段也相对延后发生。在峰后残余阶段,由于应变软化阶段岩石已达峰值强度,整体结构出现明显的剪切型裂纹,并产生较大缝隙,峰值强度点过后岩石强度瞬间大幅下降,直至稳定在残余强度。残余强度保持较长时间,是由于在水压的作用下,孔内水会沿着裂纹的破裂面及破裂孔隙快速填充,使得细砂岩

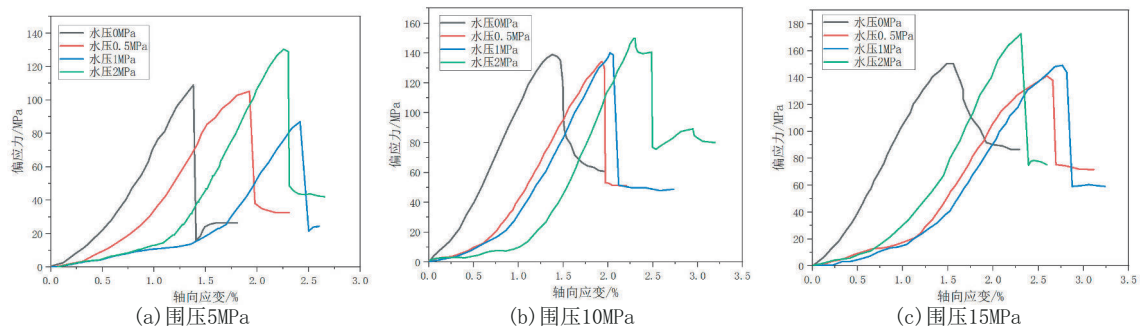


图 4 不同水压下的偏应力应变曲线

在破裂后仍保持有较大的承载力。同时,围压一定的情况下,水压越大,细砂岩所表现出来的抗压强度及残余强度基本也是越大。

2.1.2 同等水压作用不同围压下的偏应力应变曲线
在水压一定时,围压对偏应力-应变曲线的影响规律(见图5)与常规三轴围压实验数据曲线变化规律相似,随着围压的增大,偏应力-应变曲线的各个变化阶段性更加明显。当水压为2 MPa时,各等级

围压对应的偏应力-应变曲线的压密阶段走向基本一致,偏应力均缓慢增加,而应变增加相对较快;在弹性阶段,应力应变曲线的上升速度随着围压的增大而变快,且进入屈服阶段的时间提前。试验发现,水压越大,细砂岩的压密阶段持续时间越长,这是由于在低围压下,岩样内部原始初始裂纹没完全闭合,同时水压给予砂岩裂隙缓冲,使压密阶段持续时间较长。

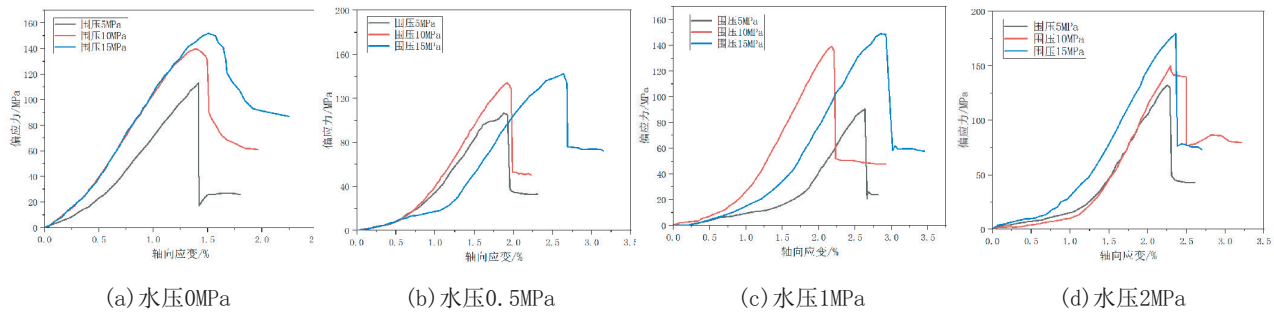


图5 不同围压下的偏应力应变

2.2 峰值强度和残余强度

试验用峰值强度和残余强度来衡量井壁所能承受的最大强度以及破碎后岩块的松散完整度,见图6。

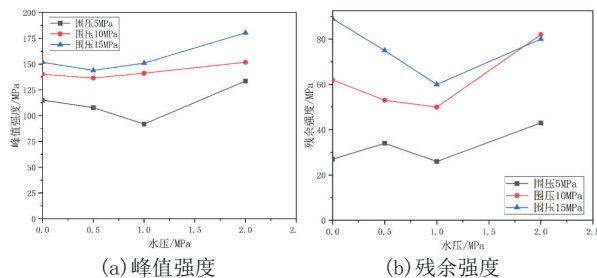


图6 水压与峰值和残余强度关系

峰值强度曲线中,围压5 MPa时,在初步加载阶段水压较低时,峰值强度出现下降,直到水压在1 MPa至2 MPa阶段出现迅速上升,说明低围压时,较高的水压可以提高井壁强度。在高围压水平下,峰值强度在水压初始加载阶段呈小幅下降,随着水压从0.5 MPa开始增大峰值强度也随之增长。低围压和高围压状态下,峰值强度整体趋势都是先下降再提高,并且随着围压的增大,峰值强度曲线也会较快进入上升阶段。

水压一定,残余强度和围压呈正相关,但是增长

的幅度减小,尤其在高围压作用下,残余强度更趋于稳定值,岩块的结构更具有完整性。围压一定时,残余强度随着水压增加呈现先减少后增加的“V”型趋势,分界点为水压1 MPa,不同围压在此水压的残余强度均为最低值,此时岩石松散破碎,但当水压大于1 MPa时,残余强度开始上升,破碎后的岩块结构不会松垮以及大面积塌落。

2.3 弹性模量

弹性模量衡量岩石受到外力作用时形变的程度,图7说明了水压对细砂岩弹性模量的影响。

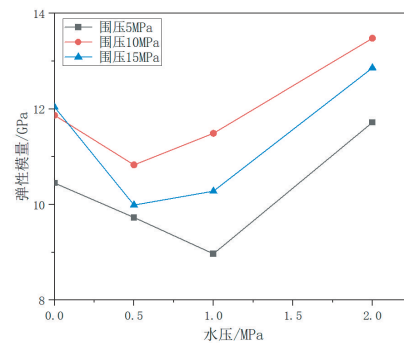


图7 水压与弹性模量关系

在水压一定,弹性模量会随着围压的增大而呈现先增大后减小的趋势,围压5 MPa时,弹性模量最小,围压10 MPa时弹性模量最大,而在围压为15

MPa时,弹性模量居中,说明孔内水压与围压的比值存在某一定值得弹性模量最大,抗变形能力最强。围压一定时,弹性模量会随着水压的增大,呈现出与残余强度相似的“V型”趋势先减小再增大。水压达2 MPa时的细砂岩的弹性模量,均超过了水压为0时的弹性模量。在水压的作用下,孔内水会通过孔壁补充到岩石的裂纹缝隙中,导致在围压作用下,细砂岩的前期压密弹性过程进行缓慢,同时削弱了围压对弹性模量的影响,而后水压增加到2 MPa时,孔内水迅速补充至原始裂纹缝隙中,使得围压作用下,弹性阶段会迅速反应,从而导致弹性模量增大,说明加载合适水压可以抵御受外力影响时钻孔的变形。

3 水压作用下的裂纹扩展分析

研究细砂岩的破坏模式对于预测井壁稳定性具有一定意义,为了研究水压的存在对裂纹发育方式和扩展路径的影响,选取围压5 MPa,水压为0 MPa与2 MPa分别进行CT扫描,结果见图8、图9。

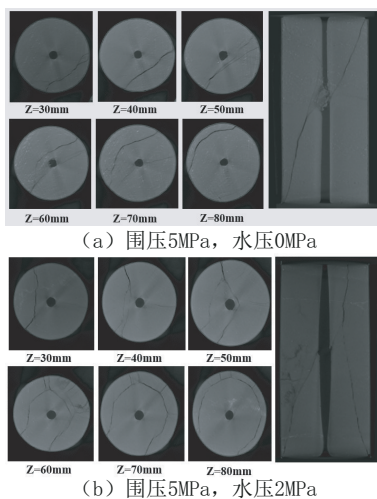


图8 CT端面切片

3.1 CT端面切片分析

在围压为5 MPa无水压作用时(见图8a),裂纹从端面的边沿部位开始发育延伸,裂纹形态类似曲线“S”型,直至岩样中部时,二次裂纹产生,发育速度快于初始裂纹,同时穿过中心孔,并有环绕中心孔延伸分布发育的趋势,次级裂纹穿过中心孔位置,致使岩样孔内孔壁中部位置坍塌,孔壁岩块脱落,直至岩样底部时,裂纹开始由孔周延伸扩展至端面边缘

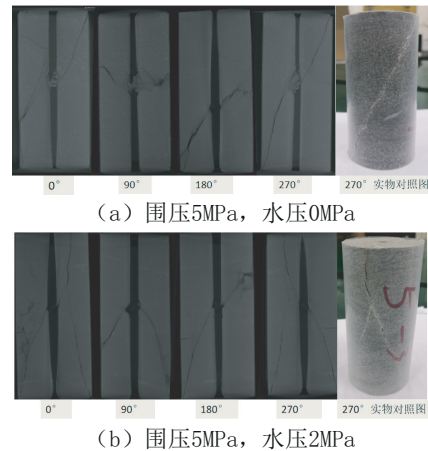


图9 CT轴向切片

部位。

在围压5 MPa水压2 MPa时(见图8b),岩样裂纹形态的扩展过程较复杂,裂纹在端面边缘部位开始发育扩展,以剪切破裂为主,在水压的作用下,试样剪切破坏并不明显,在岩样中部近端的次生裂纹增多,形成的截切裂纹完整性较差。岩样中部出现沿着孔壁周边呈环绕型分布的剪切裂纹,随着深度的增加,裂纹环绕成圆周型,并逐渐从穿过中心孔,再由中心孔壁周边近端向远端,直至达岩样边缘偏离扩展。随着水压的持续作用,主环绕型裂纹开始出现伴有次级分支翼裂纹,其分布于主环绕裂纹一侧,但支数由多变少,由复杂变单一,说明水压促进了细砂岩的环绕型剪切裂纹的增长与扩展,同时抑制了次级翼状剪切裂纹的发育与延伸。

3.2 CT轴向截面分析

细砂岩在仅受围压作用时,以单一的剪切裂纹为主(见图9a),裂纹分布表现为以平滑曲线的形态,从上端面分布延伸至下端面,并形成主要的剪切破裂面,与轴向成近45°夹角。由于岩样经过成孔处理,原应力平衡状态被破坏,孔壁内部受到不同内压作用,孔壁岩块受力不一致,剪切裂纹贯穿于内部孔壁时,裂纹与孔壁的交叉处岩块发生坍塌,坍塌的岩块较为集中且破碎,坍塌程度比水压为2 MPa的大。

在围压为5 MPa水压为2 MPa的作用下(见图9b),岩样轴向,形成一个主破裂面,发育两条明显的剪切裂纹贯穿于整个岩样上下结构面,与轴向成30°夹角。与水压为0 MPa时相比,夹角明显变小。在水压作用下,破裂面由水压为0时的靠近岩样外侧

边缘,转变为向内侧中心孔孔壁靠近,说明高水压的存在使裂纹轨迹接近中心孔孔壁。

在一定围压作用下,岩样的主剪切破裂面与轴向的夹角呈现出随着水压的增大而减小的规律,且剪切裂纹轨迹由岩样外侧向中心孔壁偏转;随着水压的增加,孔壁内岩块塌落方式由集中塌落转变为零散塌落;孔壁的塌落面积与塌落度均与水压呈现出负相关的关系,水压越大,孔内孔壁的岩块塌落面积和塌落度均变得越小。

4 结论

(1)围压一定时,细砂岩的偏应力-应变曲线的各阶段变化趋势受水压的影响较大,且峰值强度和轴向峰值应变与围压、水压基本呈正相关的关系。残余强度和弹性模量随着水压的增大呈先减小后增大的趋势。水压的作用延缓了细砂岩的压缩屈服阶段受力破坏的过程,增加了细砂岩的塑性破坏程度。

(2)在围压保持5 MPa,水压从0 MPa变成2 MPa时,细砂岩的主剪切破裂面与轴向的夹角呈现出随着水压的增大而减小的规律,且剪切裂纹轨迹由岩样外侧逐渐向中心孔壁靠近偏转;同时随着水压的增加,孔壁内岩块塌落方式由集中塌落变为零散塌落;水压增大,孔内的岩块塌落面积和塌落度均变小,剪切破裂面与轴向的夹角大小主要受水压影响。

(3)在砂岩地层钻井过程中,常用泥浆来携带岩屑、保护井壁,密度通常 $1.2\sim 2.6\text{ g/cm}^3$ 范围内,液柱压力为2 MPa,钻井深度为1000 m时,泥浆密度为 2 g/cm^3 ,具体参数根据工况合理调整,通过提高钻井液密度进而增大液柱压力,避免因液柱压力过小而发生井喷、井塌等事故,从而提高井壁稳定性。

参考文献:

- [1] 郝海洋,李勇,宋继伟,等.黔西南地区煤系地层井壁稳定技术探讨[J].钻探工程,2019,46(7):8-13,33.
- [2] 杜玉磊.页岩气钻井技术研究及工业化应用[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(7):183-184.
- [3] 王艳梅,刘宝林,王瑜,等.温度变化对花岗岩井壁稳定性的影响[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(9):14-19.
- [4] 胡小荣,柳岸.基于三剪统一强度准则的岩石裂纹剪断断裂判据[J].南昌大学学报(工科版),2019,41(2):139-143.

- [5] 张国军,张勇.基于摩尔-库伦准则的岩石材料加(卸)载分区破坏特征[J].煤炭学报,2019,44(4):1049-1058.
- [6] Furui K, Fuh G F, Abdelmalek N, et al. A comprehensive modeling analysis of borehole stability and production-liner deformation for inclined/horizontal wells completed in a highly compacting chalk formation[J]. SPE Drilling & Completion, 2010,25(4):530-543.
- [7] 丁卫华,仵彦卿,蒲毅彬,等.低应变率下岩石内部裂纹演化的X射线CT方法[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1793-1797.
- [8] 仵彦卿,曹广祝,王殿武.基于X-射线CT方法的岩石小裂纹扩展过程分析[J].应用力学学报,2005(3):484-490,513-514.
- [9] 刘维国,单钰铭,孟祥豪,等.石灰岩扩容过程中的物理参数实验研究[J].实验室研究与探索,2007(10):284-287,293.
- [10] 宫凤强,李夕兵,刘希灵.三维动静组合加载下岩石力学特性试验初探[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1179-1190.
- [11] 张国凯,李海波,王明洋,等.基于声学测试和摄像技术的单裂隙岩石裂纹扩展特征研究[J].岩土力学,2019,40(Z1):63-72.
- [12] 张晓平,王思敬,刘泉声.一种测量岩石压缩裂纹扩展过程声波波速的连续测量方法[J].工程地质学报,2018,26(1):91-96.
- [13] Wu B, Tan C P. Sand production prediction of gas field—methodology and field application[C]. SPE/ISRM Rock Mechanics Conference.
- [14] Martin C.D., Chandler N.A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, 31(6):643-659.
- [15] Zhang H, Huang G, Song H, et al. Experimental investigation of deformation and failure mechanisms in rock under indentation by digital image correlation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012,96:667-675.
- [16] Lin Q, Labuz J F. Fracture of sandstone characterized by digital image correlation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013,60:235-245.
- [17] Song H, Zhang H, Kang Y, et al. Damage evolution study of sandstone by cyclic uniaxial test and digital image correlation[J]. Tectonophysics, 2013,608:1343-1348.
- [18] Wang Y, Hu Y. Z. Using X-ray computed tomography to investigate the effect of confining pressure on meso-structural changes and crack damage evolution in soil and rock mixture during triaxial deformation[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021,25(4). DOI:10.1080/19648189.2018.1550684.
- [19] Wang Yuanyuan, Deng Hucheng, Deng Yong, et al. Study on crack dynamic evolution and damage-fracture mechanism of rock with pre-existing cracks based on acoustic emission location[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021,201.
- [20] GB/T50266—99.工程岩体试验方法标准[S].

(编辑 王文)