

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.03.015

不排气条件下低渗透岩石力学特性试验

王 伟^{1,2}, 张 宽^{1,2}, 梅胜尧^{1,2}, 曹亚军^{1,2}, 朱其志^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 以低渗透致密红砂岩为研究对象,开展了不同围压和孔隙气压下的常规三轴不排气试验,分析了不同应力路径下,围压与孔隙气压对岩石力学特性的影响。试验结果表明:围压对砂岩具有强化作用;随着围压增大,抗压强度与延性明显增大,多呈现剪切破坏形式;孔隙气压使砂岩的抗压强度降低,脆性提高,砂岩内部张力增大,对砂岩内部连续结构产生破坏,易产生劈裂破坏面。

关键词: 红砂岩;低渗透岩石;力学特性;围压;孔隙气压;不排气试验

中图分类号: TU458⁺.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2022)03-0110-08

Experimental study on mechanical characteristics of low permeability rock under gas undrained condition

WANG Wei^{1,2}, ZHANG Kuan^{1,2}, MEI Shengyao^{1,2}, CAO Yajun^{1,2}, ZHU Qizhi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Research Center for Geomechanical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To analyze the influence of confining pressure and pore air pressure on the rock mechanical properties under different stress paths, conventional triaxial tests under the gas undrained condition were carried out on a low-permeability and tight red sandstone. The experimental results show that the confining pressure has a strengthening effect on the sandstone. As the confining pressure increases, the strength and ductility of the rock increase significantly, and the rocks eventually show the form of shear failure. The pore air pressure reduces the compressive strength, while increasing the brittleness and internal tension of the sandstone, by damaging the internal continuous structure and leading to the occurrence of splitting failure plane.

Key words: red sandstone; low permeability rock; mechanical characteristics; confining pressure; pore air pressure; gas undrained test

在深层地下能源的开发和利用过程中,致密岩石作为地下工程常见的地质体,其特性对于地下岩石工程的安全与稳定性至关重要。天然气储存与核废料处置等重大工程,其所处地质环境岩层组成多为致密低渗透岩石,是由固相、液相、气相三者组成的耦合复杂体系,具备微裂隙、微裂纹、节理孔隙等缺陷,都会遇到水、气体等介质在岩体中的渗透所引发的岩石特性变化问题。因此测定低渗透岩石在气固耦合条件下的岩石力学特性具有重要的工程意义。

国内外学者对液体、气体等介质在致密脆性岩石中渗透所诱发的渗流应力耦合问题进行了很多研究^[1-11]。在利用液体介质进行的渗流试验中,张俊文等^[1-3]通过砂岩的三轴压缩试验,获取了不同排水条件下岩石力学特性对围压与孔压的响应规律;储昭飞等^[4]认识到轴压恒定下砂岩轴向应变随孔隙水压降低而减小,进而推导出用以模拟地层失水沉降的计算公式;王伟等^[5]通过花岗岩在考虑渗透水压作用下的三轴试验,得到岩石具有典型的脆性特征的结论,并给出了渗透率与体积应变关系式。在利用气体作为渗透介质的条件下,陈卫忠等^[6]建立了多孔介质下的等效边界气体渗流模型,能正确模拟夹层层面渗流问题,模拟结果表明夹层的渗透性对储气库气体渗透范围有重要影响;Metwally 等^[7]针对致密砂岩和页岩分别进行了液

基金项目: 国家自然科学基金(12072102);江苏省六大高峰人才项目(JZ-008);江苏高校“青蓝工程”项目(苏教师[2020]10号)

作者简介: 王伟(1978—),男,教授,博士,主要从事多场耦合岩石力学理论与试验研究。E-mail:wwang@hhu.edu.cn

引用本文: 王伟,张宽,梅胜尧,等.不排气条件下低渗透岩石力学特性试验[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):110-117.

WANG Wei, ZHANG Kuan, MEI Shengyao, et al. Experimental study on mechanical characteristics of low permeability rock under gas undrained condition[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3): 110-117.

体和气体渗透试验,分析了在不同围压与孔压条件下,渗透率各向异性的变化规律;陈卫忠等^[8]和王环玲等^[9]分别对大理岩和致密砂岩进行了气体稳态渗流条件下的渗透特性研究,探讨了围压、孔压、滑脱效应三者关系,证明了考虑气体滑脱效应的必要性;胡少华等^[10]利用压力脉冲法对北山花岗岩在三轴压缩过程中的气体渗透率进行了测试,结果表明花岗岩渗透特性与岩石内部微裂纹及连通性的变化密切相关;巢志明等^[11]采用低渗透砂岩进行了不同饱和度下气体渗透试验,提出采用气体渗透率与孔隙压力的指数关系来反映岩石应力-渗流耦合特征;Zhang 等^[12]进行了煤岩在多梯度、不连续应力条件下的气体真三轴渗透试验,结果表明随着气体压力降低渗透率有增大的趋势,同时在简化平均有效应力概念的基础上,确定了平均有效应力对煤岩渗透性的主导影响;Yang 等^[13]通过增大和减小三轴试验中气体压力来研究不同损伤程度下砂岩的渗透特性,结果表明随着气体压力的增大,损伤砂岩试样的渗透率增大,且在相同的气体压力条件下,有效围压递减过程中的渗透率普遍高于有效围压递增过程中的渗透率。

以上多为针对液体与气体介质渗透作用下岩石渗透特性变化趋势的研究,考虑到深部天然气开采的工程特点,深部巷道围岩内部封存气体对岩体的稳定性具有重要影响,而目前对封闭孔隙气压即不排气条件下低渗透岩石力学特性研究较少。本文以低渗透致密红砂岩(以下简称“砂岩”)为研究对象,开展不排气条件下不同围压和孔压时岩石力学行为与破裂损伤的变化规律试验研究,以期为地下岩体工程的稳定性分析提供参考。

1 试验方法

1.1 试验岩样与试验仪器

试验岩样取自湖南某地下工程钻孔岩芯,表面为红色,高倍电镜下呈颗粒状碎屑结构,颗粒之间的空隙较小,多为微小孔洞,接触面黏结较为紧密,无明显的节理或裂隙等缺陷,整体均匀性与致密性较好,气体渗透率为 $(1.5 \sim 3.0) \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。岩样天然密度为 2.47 g/cm^3 ,主要矿物成分为石英、长石、方解石和云母、绿泥石等,其中石英占 52%,长石占 31%,硬度较大,强度较高。岩样根据国际岩石力学学会(ISRM)推荐标准进行制备,直径 50 mm、长 100 mm,如图 1 所示。



图 1 试验岩样
Fig.1 Test samples

试验仪器为全自动多场耦合三轴试验仪(图 2),由河海大学与中国科学院武汉岩土力学研究所共同研制,主要由三轴压力室、轴压伺服仪、围压伺服仪、孔压伺服仪和计算机控制系统组成,可以完成岩石常规三轴压缩试验、蠕变试验以及各类多场耦合试验,适用范围广且精度高。

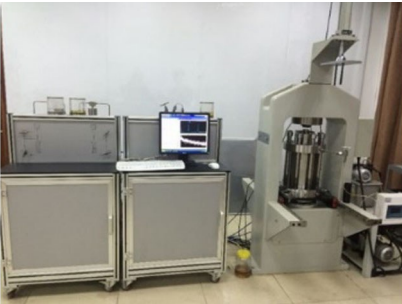


图 2 三轴试验仪
Fig.2 Triaxial testing device

1.2 试验步骤

为充分反映砂岩在不排气条件下的力学性质,减少温度变化对试验的影响,试验中严格控制实验室温度($(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$)。根据地质资料和现场岩体初始应力条件,试验围压 σ_3 分别设置为 5 MPa、10 MPa 和 15 MPa;试验中流体为高压氩气,孔隙气压 P 分别设置为 1 MPa 和 2 MPa,以此对比分析不同围压与孔隙气压对砂岩力学特性的影响。具体试验步骤如下:

- a. 岩样高温干燥处理,去除砂岩内部的孔隙结晶水。
- b. 无孔隙气压加载试验。先加载围压至预定值,打开进气阀门,缓速加载一定气压至出气口形成稳定气体渗流后打开出气阀门,保证砂岩内部无孔隙气压,以恒定速率进行偏压加载至砂岩破坏。
- c. 孔隙气压加载试验。保持进、出气口开启,加载孔隙气压至预定值后关闭进、出气阀门,保证砂岩内部孔隙气压稳定,以恒定速率进行偏压加载至砂岩破坏。
- d. 砂岩发生破坏时(加载过程中当偏压值不再增大并急剧下降时)停止加载,停止记录数据,轴压、孔压、围压依次卸载,取出岩样。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

图3为砂岩三轴压缩试验全过程偏应力-应变曲线(图中 ε_1 为轴向应变, ε_3 为环向应变;右侧为试样破坏面与素描图,反映不同应力下砂岩的破坏形式)。通过轴压 σ_1 与围压 σ_3 绘制不同孔隙气压条件下三向应力莫尔圆,对莫尔圆作破坏包络线,得到的截距与斜率大小即为砂岩黏聚力 c 与内摩擦角 φ ,与试验得到的砂岩力学参数一并列于表1。

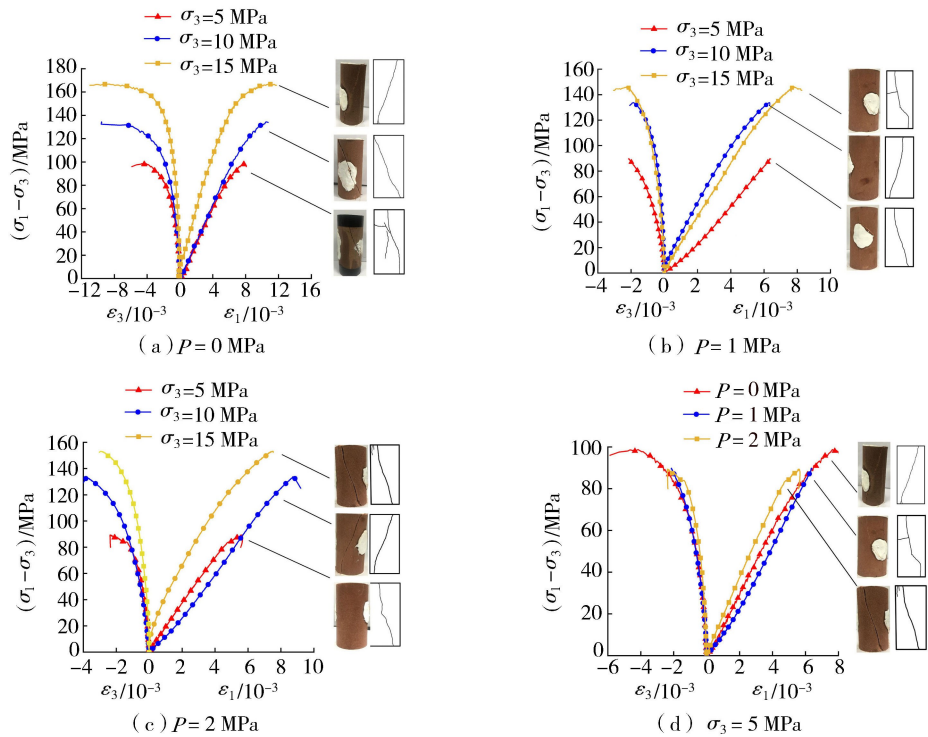


图3 砂岩三轴压缩试验偏应力-应变曲线

Fig.3 Deviatoric stress-strain curve from triaxial compression test of sandstone

表1 砂岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of sandstone

试验序号	P/MPa	σ_3/MPa	σ_c/MPa	ε_c/MPa	E_s/GPa	μ	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$
M-01	0	5	98.74	8.08	14.71	0.198	11.68	48.87
M-02	0	10	134.35	10.95	15.41	0.192	11.68	48.87
M-03	0	15	166.85	13.74	21.60	0.186	11.68	48.87
M-04	1	5	89.81	6.35	16.01	0.158	11.06	46.64
M-06	1	10	133.75	6.32	19.04	0.113	11.06	46.64
M-08	1	15	146.20	8.27	20.14	0.134	11.06	46.64
M-05	2	5	89.32	5.64	17.16	0.141	10.62	44.11
M-07	2	10	132.72	8.71	18.27	0.188	10.62	44.11
M-09	2	15	153.18	7.51	20.13	0.182	10.62	44.11

注: σ_c 为峰值强度; ε_c 为峰值应变; E_s 为弹性模量; μ 为泊松比。

由图3和表1可知,同孔隙气压,随围压增大,砂岩峰值强度不断增大,弹性模量也相应增大,泊松比则没有表现出相似的规律性。低围压($\sigma_3=5\text{ MPa}$)条件下,随孔隙气压增大,砂岩峰值强度具有微弱的减小趋势,同时砂岩的黏聚力与内摩擦角均有一定的变化,孔隙气压从 0 MPa 增大到 1 MPa 和从 1 MPa 增大至 2 MPa ,内摩擦角分别减小 4.56% 和 5.42% ,黏聚力分别减小 5.31% 和 3.98% 。

由图3可见,当砂岩强度达到峰值后,强度快速削减,内部裂隙汇集、贯通最终发生破坏。当孔隙气压为 0 MPa 时,在低围压即 5 MPa 条件下,砂岩破坏呈现以张拉为主的宏观劈裂破坏,且微小破裂面较多;伴随着围压增大,砂岩延性增强,砂岩的破坏形式开始逐渐呈现剪切破坏形式,主要裂隙呈对角状,砂岩破裂断面更

为明显。这是由于围压增大导致砂岩脆性降低,对砂岩保护效应更明显,砂岩剪切破坏增强;高围压条件下砂岩的破坏机理更多归结为剪切的发生。

由图3(c)可知,砂岩在2 MPa的孔隙气压条件下,破坏断面在端口部分多呈竖向的劈裂破坏面,伴随围压增大,剪切破坏部分加强,砂岩主要表现为劈裂破坏。这是由于砂岩在孔隙气压作用下,内部脆性提高,更易产生张拉、劈裂破坏面。

2.2 强度特征

图4为试验得到的砂岩峰值强度 σ_c 与初始有效围压 σ_{3a} 关系曲线。

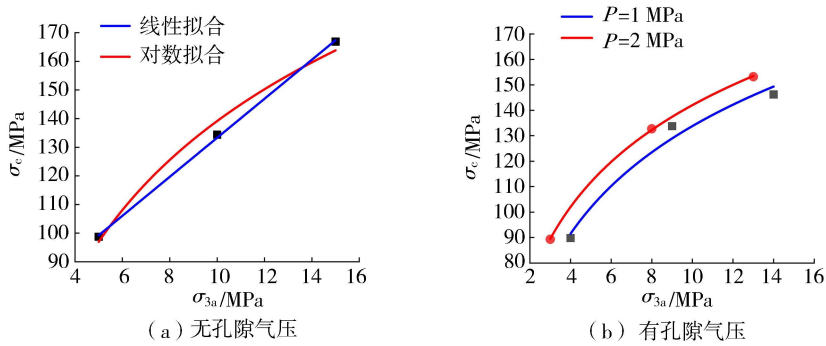


图4 砂岩峰值强度拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of peak strength of sandstone

如图4(a)所示,在无孔隙气压条件下,砂岩的峰值强度随围压增大而增大,并且相较于对数形式非线性函数关系,岩样峰值强度与围压之间更符合线性递增关系。表明对于致密砂岩而言,在无孔隙气压的条件下,围压对于砂岩强度具备线性强化作用。由图4(b)可知,有孔隙气压条件下砂岩的峰值强度与初始有效围压之间同样呈现正比增长规律,且增长速率逐渐减低,表现为“上凸”曲线,较之于线性关系,更符合对数形式的非线性增长规律,说明在不排气条件下,封闭孔隙气压的存在削弱了围压的强化作用,降低了砂岩的峰值强度及其增长速率。

同样,由表1可知,在同一围压下,有孔隙气压试验中砂岩的峰值强度和峰值应变要低于无孔隙气压试验。在孔隙气压1 MPa和2 MPa条件下,当围压为5 MPa时,试验中砂岩的峰值强度比无孔隙气压试验的峰值强度分别减小了9.04%和9.54%,峰值应变分别减小了21.41%和30.20%;当围压为10 MPa时,峰值强度在孔隙气压作用下降低幅度在1%左右,峰值应变分别减小了42.28%和20.46%;当围压为15 MPa时峰值强度分别减小了12.38%和8.19%,峰值应变分别减小了39.81%和45.34%。这是由于砂岩在不排气条件下,内部空间整体是封闭状态,随着荷载的增加,孔隙气压对砂岩内部裂纹具有加剧破坏的作用,进而降低砂岩的峰值强度。同时,砂岩内部微裂纹和微裂隙非稳定发展的速度加快,砂岩破坏的时间缩短,砂岩峰值应变降低。

2.3 变形特征

岩石作为非均匀材料,内部存在随机分布的微裂纹、微裂隙等天然缺陷,在外力作用下产生局部开裂,逐步发展至整体破坏。一般认为在岩石受压缩作用产生变形时,内部微裂纹的产生和扩展均有临界值,即裂纹起裂应力 σ_{ci} 和裂纹扩容应力 σ_{cd} 。当轴向应力达到 σ_{ci} 时,表示岩石内部开始产生拉张微裂纹,平行于最大主应力方向,此时岩石进入应力应变发展的非线性阶段,微裂纹处于稳定发展状态,应力水平多为峰值强度 σ_c 的40%^[14]。当应力达到 σ_{cd} 时,此时岩石内部微裂纹和微裂隙开始迅速扩展,进入微裂隙非稳定发展时期,裂纹逐渐贯通,岩石环向变形迅速增大,最终导致岩石发生破裂。

基于Martin^[15]提出的裂隙体积应变模型,进一步研究砂岩内部微裂纹和微裂隙扩展规律。对于岩石材料,裂纹的产生、起裂与扩展导致的轴向变形与环向变形共同导致裂隙的体积变化,通常,可用轴向应变 ε_1 与环向应变 ε_3 表示总体积应变 ε_v ,同样,可由裂纹体积应变 ε_{cv} 与同应力水平下弹性体积应变 ε_{ev} 两部分构成总体积应变。计算时采用偏应力进行体积应变计算^[3]:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 = \varepsilon_{cv} + \varepsilon_{ev} \tag{1}$$

$$\varepsilon_{ev} = \frac{(1 - 2\mu)(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_s}$$

(2)

根据式(1)(2)计算结果绘制出岩样在围压 10 MPa、孔隙气压 1 MPa 压缩作用渐进破坏条件下体积应变阶段如图 5 所示(取体积压缩为正值)。由图 5 可知脆性砂岩的变形破坏过程主要分为 5 个阶段:阶段 1 为以裂隙闭合应力 σ_{ec} 为阈值的非线性压密阶段;阶段 2 为弹性变形阶段,总体积应变增量等于弹性体积应变增量,原始裂纹闭合,轴向和环向应变呈线性变化;阶段 3 为裂纹稳定扩展阶段,裂纹张开,体积膨胀,裂纹体积应变曲线向负方向偏移,其拐点对应轴向应力即为起裂应力 σ_{ci} ;阶段 4 即裂纹非稳定扩展阶段,以 σ_{cd} 为特征应力,裂纹进一步扩张;阶段 5 为砂岩应力达到峰值强度 σ_c 后的裂纹破裂变形阶段,由于应变片对峰后应力应变数据采集的限制,阶段 5 曲线未绘出。

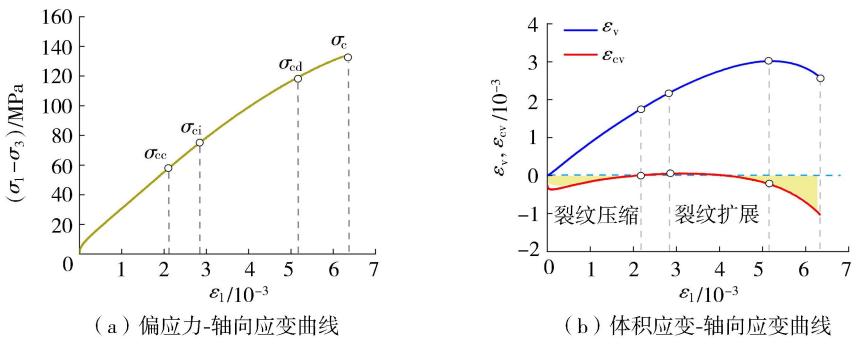


图 5 砂岩体积应变阶段示意图

Fig.5 Sketch map of volume strain stage of sandstone

依据上述判据,图 6 给出了不同围压和孔隙气压条件下砂岩裂纹体积应变、总体积应变与偏应力关系曲线。

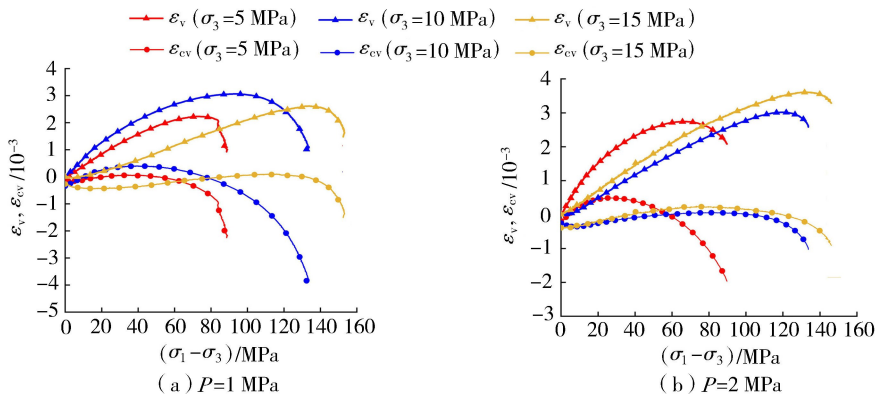


图 6 砂岩裂纹体积应变、总体积应变和偏应力关系曲线

Fig.6 Deviatoric stress-crack volume strain/total volume strain relationship curves of sandstone

根据图 6 中各应力状态下裂纹体积应变曲线拐点处偏应力值可确定起裂应力 σ_{ci} ,利用总体积应变曲线顶点数值确定扩容应力 σ_{cd} 。考虑到砂岩在压缩过程中,裂纹体积存在从压密到扩容的转变,即某应力下裂纹体积应变可视为未产生变化(即 $\varepsilon_{ev} = 0$),定义此时的应力为 σ_{cl} 。表 2 为裂纹体积应变曲线特征应力。

表 2 裂纹体积应变曲线特征应力

Table 2 Feature stress of fracture volume strain curve

σ_3/MPa	P/MPa	σ_{ci}/MPa	σ_{cl}/MPa	σ_{cd}/MPa	σ_c/MPa	σ_{ci}/σ_c	σ_{cl}/σ_c	σ_{cd}/σ_c
5	1	28.3	58.2	67.5	89.81	0.32	0.65	0.75
5	2	32.2	50.3	73.2	89.32	0.36	0.56	0.82
10	1	75.6	102.3	119.4	133.75	0.57	0.76	0.89
10	2	44.9	76.5	94.9	132.72	0.34	0.58	0.72
15	1	85.5	119.1	132.4	146.20	0.58	0.81	0.91
15	2	114.4	131.2	134.0	153.18	0.75	0.86	0.87

由表 2 可知, σ_{ci} 和 σ_{cl} 与围压呈正比增长关系,且趋势具有一致性。由于初始围压加载对于砂岩内部微

裂纹与孔隙具有约束作用,随着围压的增大,砂岩内部孔隙间压密程度增大,微裂纹产生时间延后,起裂应力增大。同样,相同孔隙气压条件下,砂岩扩容应力 σ_{cd} 和 σ_{cd}/σ_c 也随着围压的增大而增大,并且高围压条件下扩容应力与峰值强度更为接近,考虑到高围压会限制砂岩内部微裂纹扩展,裂纹产生的宽度会受到限制,砂岩体积膨胀的趋势会滞后;高围压条件下, σ_{cd}/σ_c 随孔隙气压增大呈现减小的趋势,可以理解为在更高孔隙气压作用下,进入裂纹非稳定扩展阶段后,裂纹体积膨胀速率更快,迅速发生破坏。

表 2 反映出起裂应力水平在 0.31 ~ 0.75 之间,其值越小表示砂岩的非均匀程度越大。可以看出高围压下由于裂纹闭合度高,闭合速率较快,砂岩表现出更好的均质性,并且在不同孔隙气压作用下,表现出的裂隙应力水平也具有一定差异,说明孔隙气压对砂岩破坏作用主要表现在破坏内部结构和加速裂纹的非稳定扩展。基于砂岩起裂应力水平,参考王宇等^[14]提出的岩石脆性指标公式,随着 σ_{ci}/σ_c 值提高即岩石具备更好的均质性,岩石的脆性指标降低。利用起裂应力与峰值强度比值定义的脆性指标,更多的反映岩石的强度特征,体现为高围压、低孔隙气压下砂岩脆性程度降低,不易迅速破坏。

2.4 能量特征

在上述砂岩变形特征的分析中,强调了在荷载作用下砂岩发生轴向与环向变形的过程。实际上砂岩在荷载作用下发生变形破坏可以认为是一个热力学过程,是砂岩对外部环境的能量进行吸收、释放和转化的过程。当砂岩受到外界荷载作用后,会吸收这些输入的能量,砂岩在部分能量作用下发生弹性变形,并以弹性能的形式储存,砂岩内部的微裂纹在其余部分能量作用下扩展,降低砂岩的储能极限,一旦外界输入的能量超过储能极限,释放出来的能量将使砂岩发生破坏。

试验中假设砂岩与试验系统是一个封闭系统,试验时没有发生热量交换,忽略砂岩在峰值强度处发生破坏时转化的动能,此时砂岩内所有的能量均来自千斤顶轴向荷载和环向油压的做功,此时的总输入能量密度 $U^{[16]}$ 为

$$U = U_d + U_e \tag{3}$$

式中: U_d 为耗散能密度; U_e 为弹性能密度。

不考虑渗流应力耦合过程中孔隙气压对砂岩做的功,根据热力学第一定律,总能量密度可以表示为

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 \tag{4}$$

考虑到试验中第二主应力与第三主应力大小相等,弹性能密度可以表示为

$$U_e = \frac{1}{2E_s} [\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu\sigma_3(2\sigma_1 + \sigma_3)] \tag{5}$$

根据公式(3)(4)(5),结合已知试验数据,对不排气条件下砂岩三轴压缩变形破坏过程中能量演化与轴向变形的关系进行分析,图 7 为不同应力状态下三轴压缩不排气试验中的能量特征曲线。

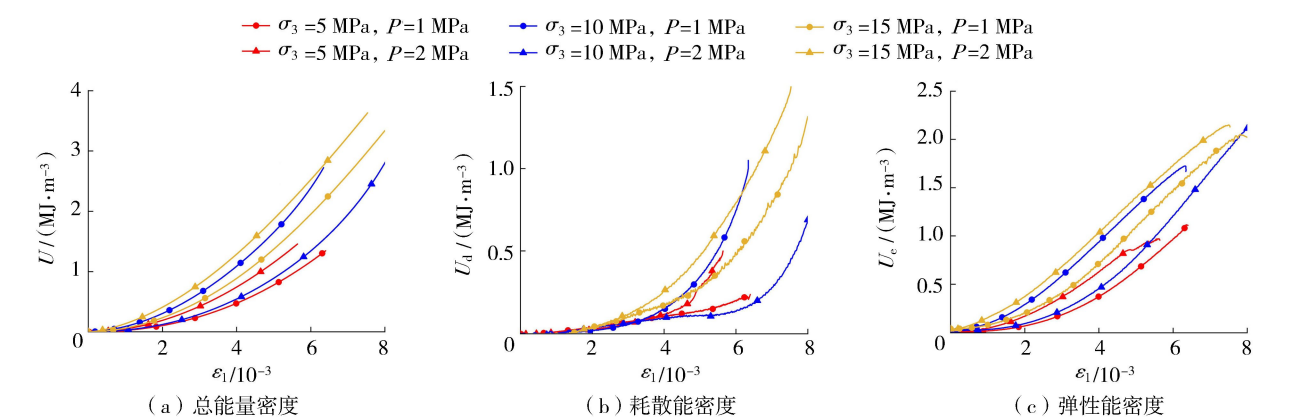


图 7 砂岩三轴压缩试验能量特征曲线

Fig.7 Energy characteristic curves of sandstone under triaxial compression test

由图 7 可以看出,裂纹体积在非线性压密阶段随着偏应力的不断加载,即输入的能量不断增加,砂岩的弹性能密度随着轴向应变缓慢增加,而砂岩内部原生的微裂纹不断压密合并发生摩擦,导致输入的一小部分能量被耗散,耗散能密度较小。在线弹性阶段,砂岩内部微裂隙基本都压密闭合,砂岩在不断吸收能量,应

硬化机制起主导作用,大部分能量转化为弹性能储存在砂岩中,表现为弹性能密度随着轴向应变保持线性增长,而耗散能密度基本保持不变。到了裂纹稳定扩展阶段,砂岩内部新的微裂纹逐渐扩展,越来越多的能量会以裂纹表面能等形式耗散释放,此时弹性能仍处于主导地位。随着荷载水平超过砂岩的起裂应力,砂岩开始进入裂纹非稳定扩展阶段,砂岩内部微裂纹进一步扩展发展,大量能量以其他形式耗散释放,此时弹性能密度增速逐渐变缓,耗散能密度出现快速增长,占比升高。随着损伤程度的不断加剧,砂岩内部裂隙不断扩展,交互贯通形成宏观断裂带,当砂岩强度到达峰值强度后,之前储存的弹性能瞬间大量释放,转化成砂岩的动能、热能等耗散。

由上述分析可知,耗散能的迅速增长是导致砂岩损伤加剧的重要原因,因此可通过分析耗散能的演变规律研究不同围压和孔隙压力对砂岩损伤特性的影响。由图 7(b)可知相同孔隙气压条件下,围压越高,耗散的应变能越大。这说明高围压条件下砂岩内部的储能极限更高,能够耗散释放的弹性能更大。在围压 5 MPa、15 MPa 条件下,随着孔隙气压的增大,砂岩耗散能密度曲线增长速率越快,说明孔隙气压的作用使得砂岩内部损伤加剧,发生损伤时能量释放更加剧烈。

2.5 损伤破坏

考虑到砂岩均质性较好,宏观上表现为各向同性,根据 Lemaitre^[17] 对各向同性材料损伤因子的定义和刘东桥等^[18] 的假设,通过对围压 15 MPa、孔隙气压 1 MPa 条件下砂岩变形过程进行参数反演,进而得到轴向应变的砂岩损伤因子演化曲线,图 8 为偏应力-轴向应变、损伤因子-轴向应变曲线。由图 8 可知,在加载前期,即裂纹闭合之前,损伤未见明显发展;随后微裂纹不断闭合摩擦,局部能量耗散,损伤缓慢发展;加载至起裂应力 σ_{ci} 后进入裂纹稳定扩展阶段,能量耗散加剧,损伤迅速发展。

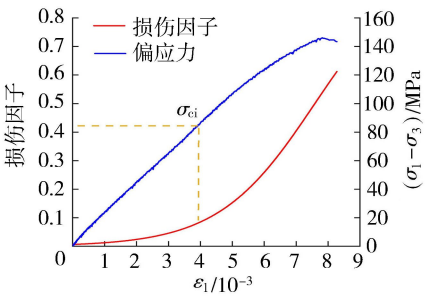


图 8 三轴压缩不排气试验偏应力、损伤因子与轴向应变的关系

Fig. 8 Relationships of deviatoric stress, axial strain and damage factor in triaxial compression test under gas undrained condition

3 结 论

- a. 围压对砂岩起着强化作用,砂岩的峰值强度、峰值应变均与围压呈正比关系。随围压的增大,砂岩延性明显增大。
- b. 孔隙气压的加载会使砂岩的抗压强度下降,使内部颗粒黏结产生张力破坏作用。砂岩的起裂应力和扩容应力均随孔隙气压的增大而减小,在孔隙气压作用下气体进入砂岩内部,改变内部微裂隙结构,加速砂岩损伤的发生,降低了砂岩强度。
- c. 砂岩在不排气条件下主要呈现宏观的劈裂破坏面,围压增大会降低砂岩脆性,砂岩更易发生剪切破坏,孔隙气压加载使砂岩脆性增强,加剧砂岩的劈裂破坏程度。

参考文献:

[1] 张俊文,宋治祥,范文兵,等. 应力-渗流耦合下砂岩力学行为与渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(7):1364-1372. (ZHANG Junwen, SONG Zhixiang, FAN Wenbing, et al. Experimental study on mechanical behavior and permeability characteristics of sandstone under stress-seepage coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(7):1364-1372. (in Chinese))

[2] 许江,杨红伟,彭守建,等. 孔隙水压力-围压作用下砂岩力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(8):1618-1623. (XU Jiang, YANG Hongwei, PENG Shoujian, et al. Experimental study of mechanical property of sandstone under pore water pressure and confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(8):1618-1623. (in Chinese))

[3] 王伟,陈曦,田振元,等. 不同排水条件下砂岩应力渗流耦合试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):3540-3551. (WANG Wei, CHEN Xi, TIAN Zhenyuan, et al. Experimental study on stress-seepage coupling properties of sandstone under different drainage conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(Sup2):3540-3551. (in Chinese))

- [4] 储昭飞,刘保国,张磊,等. 孔隙砂岩三轴压缩排水试验及地层失水沉降计算[J]. 岩土力学,2017,38(增刊1):225-232. (CHU Zhao-fei, LIU Bao-guo, ZHANG Lei, et al. Experimental study of influence of seepage pressure on joint stress-seepage coupling characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup1): 225-232. (in Chinese))
- [5] 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 Weiya, WANG Rubin, et al. Permeability of dense rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 40-47. (in Chinese))
- [6] 陈卫忠,谭贤君,伍国军,等. 含夹层盐岩储气库气体渗透规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7):1297-1304. (CHEN Weizhong, TAN Xianjun, WU Guojun, et al. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1297-1304. (in Chinese))
- [7] METWALLY Y M, SONDERGEID C H. Measuring low permeability of gas-sands and shales using a pressure transmission technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(7): 1135-1144.
- [8] 陈卫忠,杨建平,伍国军,等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(2):236-243. (CHEN Weizhong, YANG Jianping, WU Guojun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 236-243. (in Chinese))
- [9] 王环玲,徐卫亚,巢志明,等. 致密岩石气体渗流滑脱效应试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(5):777-785. (WANG Huanling, XU Weiya, CHAO Zhiming, et al. Experimental study on slippage effects of gas flow in compact rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 777-785. (in Chinese))
- [10] 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 Shaohua, CHEN Yifeng, ZHOU Chuangbing. 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))
- [11] 巢志明,王环玲,徐卫亚,等. 不同饱和度砂岩渗透率、孔隙度随应力变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(3):665-680. (CHAO Zhiming, WANG Huanling, XU Weiya, et al. Variation of permeability and porosity of sandstones with different degrees of saturation under stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 665-680. (in Chinese))
- [12] ZHANG Y, ZHANG J, DU W, et al. Gas seepage under continuous and step loading based on true triaxial seepage test apparatus [J]. Experimental Techniques, 2021, 45(2): 121-132.
- [13] YANG S Q, HUANG Y H. Effect of damage on gas seepage behavior of sandstone specimens[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(4): 866-876.
- [14] 王宇,李晓,武艳芳,等. 脆性岩石起裂应力水平与脆性指标关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(2):264-275. (WANG Yu, LI Xiao, WU Yanfan, et al. Research on relationship between crack initiation stress level and brittleness indices for brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 264-275. (in Chinese))
- [15] MARTIN C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(5): 698-725.
- [16] 谢和平,鞠杨,黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(17):3003-3010. (XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010. (in Chinese))
- [17] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2): 233-245.
- [18] 刘冬桥,王焯,张晓云. 岩石应变软化变形特性及损伤本构模型研究[J]. 岩土力学,2017,38(10):2901-2908. (LIU Dongqiao, WANG Zhuo, ZHANG Xiaoyun. Characteristics of strain softening of rocks and its damage constitutive model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2901-2908. (in Chinese))

(收稿日期:2021-06-10 编辑:熊水斌)