

饱水孔道砂岩力学特性试验

刘强,赵延林*,唐利明,程建超,李阳,马文豪

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:针对南方广泛存在矿山岩体含水层中的砂岩,利用 MTS815 试验机进行不同围压下三轴压缩试验,利用 RMT-150C 试验机进行单轴压缩试验,结果表明:(1)单轴压缩条件下,岩样的全应力-应变曲线明显分为 4 个阶段:孔隙裂隙压密阶段、弹性变形至裂隙发展阶段、非稳定破裂发展阶段、峰后破坏阶段。(2)单轴压缩条件下峰后应力-应变曲线表现出悬崖式下降趋势的特征;三轴压缩条件下无明显的压密阶段,峰后应力-应变曲线表现出由脆性向塑性转化趋势的特征。(3)随着围压的增大,除泊松比表现出减小的趋势之外,其余力学参数均有增大的趋势,对峰值强度和峰值应变的影响最为显著,峰值应变逐渐增大,岩样的塑性不断增加,表现出延性破坏的特征。(4)单轴压缩条件下岩样主要以 X 型裂纹的剪切破裂为主,单一斜平面的剪切破裂为辅;三轴压缩条件下岩样主要以单一裂纹的剪切破裂为主。

关键词:孔道砂岩;围压;三轴压缩;单轴压缩;峰值强度;峰值应变;延性

中图分类号:TU458.3

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)03-0060-06

Experimental Study on Mechanical Characteristics of Saturated Water Pore Sandstone

Liu Qiang, Zhao Yanlin, Tang Liming, Cheng Jianchao, Li Yang, Ma Wenhao

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Laboratory on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Aiming at the sandstone in the aquifer of the rock mass in the south, under different confining pressure, the triaxial compression test by using MTS815 test system, the uniaxial compression test is carried out by using the RMT-150C test machine. Results show that: (1) Under the condition of uniaxial compression, the full stress-strain curve of the rock sample is obviously divided into four stages, i.e. pore fracture compaction stage, elastic deformation to fracture development stage, unsteady fracture development stage, and post-peak failure stage; (2) The post-peak stress-strain curve shows the characteristic of the cliff-type downward trend, and there is no obvious compaction stage under the triaxial compression condition. The post-peak stress-strain curve exhibits a characteristic of the transition from elastic brittleness to elastoplasticity; (3) With the increase of confining pressure, except for the Poisson's ratio showing a decreasing trend, the other mechanical parameters have an increasing trend, the peak intensity and peak strain have the most significant influence, and the peak strain gradually increases. The plasticity of the rock sample is increasing, showing the characteristics of ductile damage, and (4) Under the condition of uniaxial compression, the rock sample is mainly shear fracture of X-shaped crack, and the shear rupture of single inclined plane is supplemented. Under the condition of triaxial compression, the rock sample is mainly shear cracking of single crack.

收稿日期:2019-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774131);中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金资助项目(SKLCRSM16KF12);长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2017508/KY)

*通信作者,E-mail: yanlin_8@163.com

Keywords: pore sandstone; confining pressure; triaxial compression; uniaxial compression; peak strength; peak strain; ductility

矿山岩体存在于地下,且常处于复杂三向应力状态下的地质条件中,多数岩石长期被浸泡在地下水中,因此,研究饱和水岩石在单轴、三轴压缩条件下的力学特性对矿山工程开采具有重要意义.国内外专家及学者^[1-7]对此做了相关的研究工作并取得了丰富的研究成果,杨圣奇等^[8,9]针对类岩石材料和大理岩研究了三轴强度与变形特性;李鹏飞等^[10]三轴压缩条件下对北山花岗岩的三轴抗压强度参数演变规律进行了研究;皇甫琪等^[11]探讨了西鞍山花岗岩变形破坏及能量损失特征;泥岩^[12]、碎屑砂岩^[13]、页岩^[14]等也通常用于三轴压缩试验.针对不同的温度条件下,张晋勋等^[15]探讨了冻结饱水砂卵石不同温度不同围压三轴压缩下的变形特性;苏承东等^[16,17]三轴压缩条件下对高温后粗砂岩以及红砂岩三轴抗压强度与变形特性进行了探讨;针对不同的水文条件,赵延林等^[18]探讨了茅口灰岩在三轴压缩作用下的流体-固耦合效应.

砂岩为淡褐色或红色的致密的沉积岩,多存在于地下含水层中,是南方矿井开采中广泛遇到的工程介质.对于单轴、三轴条件下饱水孔道砂岩强度特性研究,还缺乏完整的试验研究,为了深入研究岩石的单轴、三轴压缩作用下的破坏过程,本文选取饱水孔道砂岩为试验岩样,开展了不同围压下三轴压缩试验,研究了其饱水孔道砂岩的力学和变形等特性.

1 力学试验

1.1 岩样制取

岩样取自湖南某矿井,该矿井主井埋深 203~240 m 段为砂岩含水层,岩性为细砂岩,选取均质性和完整度比较好的岩块,利用岩石取芯机对原始岩块进行水钻法钻孔取芯,获取圆柱形端面平整的长岩块,最终加工成符合《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266-2013).经加工后,制得的试样内孔径为 6 mm,高度为 100 mm,直径为 50 mm 的圆柱形试样,如图 1 所示.由于取样及加工过程中砂岩有部分水分流失,为了原岩达到饱和度进行砂岩饱水处理.饱水孔道砂岩岩样基本物理参数如表 1 所示.



图 1 孔道砂岩岩样

表 1 饱水孔道砂岩岩样基本物理参数

编号	H/mm	D/mm	d/mm	m_s/g	m_w/g	$\omega_s/\%$
UCS-1	100.9	49	5.6	428.7	448.4	4.59%
UCS-2	100.5	48.5	5.2	424.1	447.7	5.56%
UCS-3	100.6	48.8	5.4	426.4	442.1	3.68%
TCS-1	100.7	48.9	5.7	427.5	447.2	4.61%
TCS-2	100.6	48.6	5.9	423.3	444.8	5.08%
TCS-3	100.5	49.1	5.8	425.1	444.6	4.59%

注: H 为试件高度; D 为试件直径; d 为试件孔径; m_s 为干质量; m_w 为饱水质量; ω_s 为饱水率

1.2 试验装置

单轴压缩试验采用 RMT-150C 试验机(如图 2 所示),该试验机广泛应用于岩石和混凝土类材料的力学特性测试,是进行常规单轴压缩破坏试验最常用的试验设备.在数据采集上,系统采用了智能采样和智能保护措施,提高了采样数据的有效性,并降低了可能发生的故障率.在试验过程中可以测试出基本力学和变形指标,同时还可以粗略绘制出试验试件的应力-应变曲线.

三轴压缩试验采用美国 MTS 公司生产的多功能岩石力学试验机(MTS815)(如图 3 所示).该实验系统是目前国内配置最高、性能优质的岩石力学试验装置,拥有 4 套独立的控制系统,分别为轴力、围压、孔

隙水压和温度加载系统与一套高精度的数据采集系统;其整体刚度比较大,整体刚度为 10.5×10^9 N/m,最大轴向压力可达 4 600 kN,最大围压和最大裂隙水压力可达 140 MPa.



图2 RMT-150 压缩试验机



图3 MTS815 岩石力学试验系统

1.3 单轴压缩试验

利用 RMT-150C 试验机进行单轴压缩试验,岩样分别编号为 UCS-1, UCS-2, UCS-3,将岩样安装在压力机底座中心位置处,安装轴向与侧向传感器并使传感器与岩样接触良好.将压头下降至距岩样上表面 2 mm 处再施加一定的轴向预应力使压头与岩样接触紧密.用位移加载,位移速率按 0.005 mm/s 加载直到饱水孔道砂岩破坏.

1.4 三轴压缩试验

将岩样放置于三轴腔内,试样外面用一层耐高温热缩管包裹牢固,然后使用大功率电热吹风机对热缩管周围进行均匀加热,使热缩管紧贴砂岩岩样壁,将环向引伸计安装在岩件中间向上偏移的位置,实时测量环向位移,将轴向引伸计安装在环向引伸计中间向下偏移的位置,用来监测轴向位移,如图 4 所示.

为研究围压对孔道砂岩三轴压缩下强度变化的规律,将岩样分为 3 组,每组 1 个岩样,分别为 TCS-1, TCS-2, TCS-3,围压分别设置为 $\sigma_3 = 10, 20, 30$ MPa,试验时,预加载 2.5 kN 轴力,防止加围压过程中岩样移动,同时检测环向引伸计、轴向引伸计是否正常.然后再以 0.05 MPa/s 的加载速率加载围压,当围压达到预设围压值后,采用位移控制,保持围压不变,之后以 0.005 mm/s 的位移加载速率加载,直至岩样破坏.试验过程中计算机自动采集数据,为了精确记录试样变化情况,数据采集系统每 0.1 s 采集 5 次数据,记录下试样破坏时最大的轴力即可转化为峰值强度.实时进行轴向应力、轴向位移以及径向位移监测.

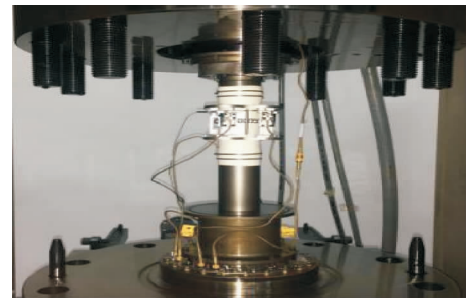


图4 试验装置

2 试验结果分析

2.1 单轴压缩试验结果分析

图 5 为试件轴向应力-应变曲线图.由图 5 可知单轴全应力-应变曲线分成 4 个阶段:(1)孔隙裂隙压密阶段(OA 段):该阶段呈上凹型.饱水孔道砂岩岩样内部的裂隙和孔隙的水在外力作用下逐渐溢出,体积收缩造成的;(2)弹性变形至裂隙发展阶段(AB 段):该阶段呈近似直线型.主要因为当原生结构面或微裂隙在外力作用下闭合之后,砂岩试件视为线弹性体,随着加载的轴向荷载增大,砂岩内部的微裂纹不断地产生,一直保持稳定发展;(3)非稳定破裂发展阶段(BC 段):原有裂纹和新生裂纹不断交叉融合,形成大的宏观裂纹,直到试件发生破坏;(4)峰后破坏阶段(CD 段),该阶段曲线呈现出悬崖式下降趋势,施加轴向荷载超过岩石的峰值强度,内部裂隙演变成表面宏观裂纹,承载能力迅速降至零,岩样发生破坏.

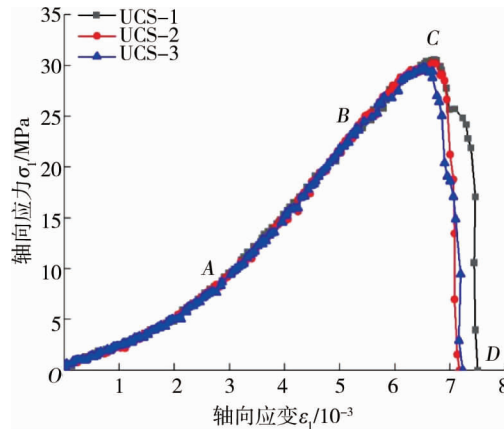


图 5 试件轴向应力-应变曲线

将计算结果汇总到表 2 中,从表中力学参数分析所知,3 组岩样单轴抗压强度分别为 31.57, 30.32, 28.89 MPa,平均值为 30.03 MPa,离散程度为 2.78%,这 3 组饱水砂岩均质性较好,比较符合工程实际要求.

表 2 单轴压缩试验力学参数

岩样编号	σ_{\max} /MPa	$\epsilon_{\max}/10^{-3}$	E_{av} /GPa	E_{50} /GPa	$\sigma_{c50\%}$ /MPa	$\epsilon_{x50}/10^{-3}$
UCS-1	31.57	6.10	5.68	3.92	14.81	3.78
UCS-2	30.32	6.67	5.29	4.00	14.62	3.65
UCS-3	28.89	6.52	5.32	3.96	14.57	3.68

注: σ_{\max} 为峰值强度; ϵ_{\max} 为峰值应变; E_{av} 为弹性模量; E_{50} 为变形模量; $\sigma_{c50\%}$ 为抗压强度 50%时的应力值; ϵ_{x50} 为应力为 σ_{50} 时的轴向应变值

2.2 三轴压缩试验结果分析

通过采集得到的数据绘制应力-应变曲线,如图 6 所示.据图 6 可知,砂岩的峰值强度随着围压的逐渐增加而增大.

图 6a 所示,三轴压缩条件下岩样的轴向应力-应变曲线峰值前变化规律与单轴压缩条件下的峰值前极其相似,但不同围压下的应力-应变曲线,却没有特别明显的压密阶段.在峰值后阶段,孔道砂岩试样的残余强度大小: $\sigma_{rTCS-1} < \sigma_{rTCS-2} < \sigma_{rTCS-3}$.

图 6b 所示,在不同围压状态下,当围压 $\sigma_3 = 10$ MPa 时,峰值前阶段表现出弹-塑性力学特性.当 σ_3 为 20, 30 MPa 时,峰前阶段表现出弹性特性.在峰后阶段,当砂岩试块达到屈服强度后,3 条曲线环向应变都没有出现瞬时急剧跌落的现象.

岩样的泊松比、弹性模量是衡量岩石变形特性的常用指标参数,按《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266-2013)里的方法计算不同围压下岩石的泊松比、弹性模量:

$$\mu = \frac{\epsilon'_3 - \epsilon_3}{\epsilon'_1 - \epsilon_1}; \quad E_{av} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_{1b} - \epsilon_{1a}}; \quad E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\epsilon_{x50}}$$

式中: μ 为岩石的弹泊松比; ϵ_3 为线弹性段的起始点的环向应变; ϵ'_3 为线弹性段的终止点的环向应变; ϵ_1 为线弹性段的起始点的轴向应变; ϵ'_1 为线弹性段的终止点的轴向应变; E_{av} 为岩石的弹性模量,MPa; σ_a 为线弹性段的起始点的应力值,MPa; σ_b 为线弹性段的终止点的应力值,MPa; ϵ_{1a} 为线弹性段的起始点的轴向应变

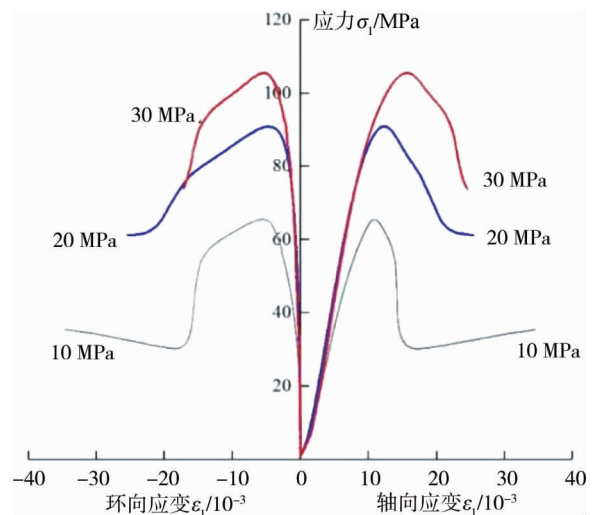


图 6 三轴压缩下应力-应变曲线

值; ε_{1b} 为线弹性段的起始点的轴向应变值; $E_{50}, \sigma_{50}, \varepsilon_{x50}$ 为峰值强度 50%处的变形模量,应力与轴向应变。

将试验所获得的数据进行整理,汇总于表 3 中.从图 7 可以看出,随着围压的逐渐增加,饱水孔道砂岩岩块的峰值强度和轴向峰值应变增加,同时,弹性模量和变形模量也逐渐增加.表现出由弹脆性向弹塑性发展的趋势,环向应变减小,泊松比也随着减小.高围压作用下,抑制了环向的变形.综上所述,三轴压缩条件下,饱水孔道砂岩的抗压强度与轴向变形和围压大小一定的正比例关系,在低围压作用下,孔道砂岩岩块表现出脆性破坏,高围压作用下,岩样的破坏形态逐渐转化为延性破坏,以及岩石的残余强度逐渐增大的同时峰后的应变值也相应增大。

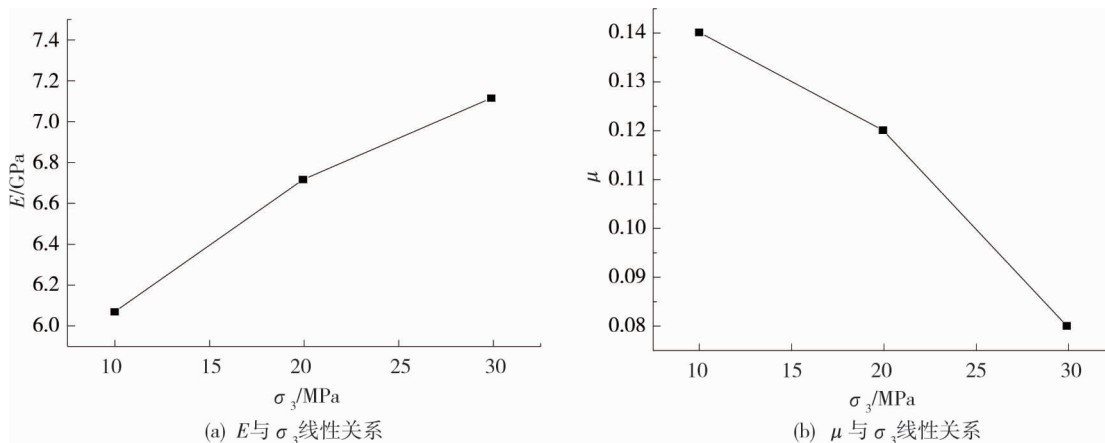


图 7 围压与形变参数的关系

表 3 三轴压缩试验各力学形变参数

岩样编号	σ_1 /MPa	μ	E_{av} /GPa	E_{50} /GPa	σ_3 /MPa	θ /(°)
TCS-1	61.37	0.14	6.07	7.30	10	50
TCS-2	86.71	0.12	6.72	8.60	20	54
TCS-3	99.37	0.08	7.12	9.10	30	57

注: σ_1 为峰值强度; μ 为泊松比; E_{av} 为弹性模量; E_{50} 为变形模量; σ_3 为围压强度; θ 为破裂角度

2.3 破坏特征

单轴压缩条件下,饱水孔道砂岩的破裂形式主要以 X 型的剪切破坏为主,单斜面的剪切破坏为辅.如图 8 所示.

三轴压缩条件下,岩样的破坏形态主要以单一的剪切破坏为主,三轴抗压强度随着围压的逐渐增大,表现出线性增大的规律,且岩石的变形能力有一定的提高,破裂角也有相应的增大的趋势.如图 9 所示.

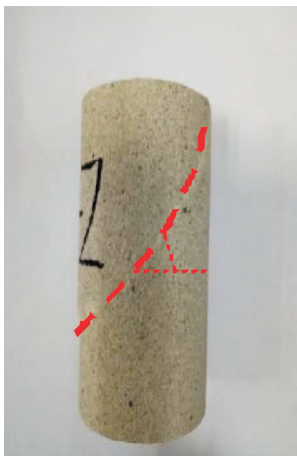


图 8 单轴抗压强度岩样破坏模式

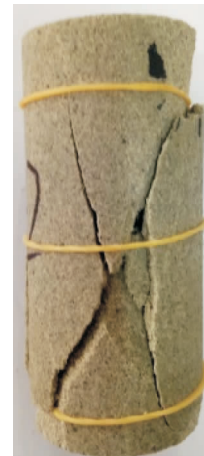


图 9 三轴压缩下岩样的破坏形态

3 结论

1)单轴压缩条件下,岩样的全应力-应变曲线明显分为4个阶段,峰后应力-应变曲线表现出悬崖式下降趋势的特征;三轴压缩条件下无特别明显的压密阶段,峰后应力-应变曲线表现出由弹脆性向弹塑性转化趋势的特征.

2)随着围压的增大,除泊松比表现出减小的趋势之外,其余力学参数均有增大的趋势,对峰值强度和峰值应变的影响最为显著,峰值应变逐渐增大,岩样的塑性不断增加,表现出延性破坏的特征.

3)单轴压缩条件下,饱水孔道砂岩主要以X型裂纹的剪切破裂为主,单一斜平面的剪切破裂为辅;三轴压缩条件下岩样主要以单一裂纹的剪切破裂为主,三轴抗压强度随着围压的逐渐增大,表现出线性增大的规律,且岩石的变形能力有一定的提高,破裂角也有相应的增大的趋势.

参考文献:

- [1] Klein E, Baud P, Reuschlé T, et al. Mechanical behaviour and failure mode of Bentheim sandstone under triaxial compression [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(1/2): 21-25.
- [2] Oda M, Takemura T, Aoki T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite [J]. *Mechanics of Materials*, 2002, 34(6): 313-331.
- [3] Charalampidou E M, Hall S A, Stanchits S, et al. Characterization of shear and compaction bands in a porous sandstone deformed under triaxial compression [J]. *Tectonophysics*, 2011, 503(1/2): 8-17.
- [4] Alsayed M I. Utilising the Hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(3): 355-366.
- [5] 彭守建,王哲,许江,等.三轴压缩条件下饱水岩石破坏后区荷载速率效应试验研究[J].*岩土力学*,2018,39(s2):72-82.
- [6] 李露露,高永涛,周喻,等.单轴压缩条件下含三叉裂隙类岩石试样力学特性的细观研究[J].*岩土力学*,2018,39(10): 3668-3676.
- [7] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2013.
- [8] 杨圣奇,陆家炜,田文岭,等.不同节理粗糙度类岩石材料三轴压缩力学特性试验研究[J].*岩土力学*,2018,39(s1): 21-32.
- [9] 杨圣奇,苏承东,徐卫亚.大理岩常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J].*岩土力学*,2005(3):475-478.
- [10] 李鹏飞,赵星光,郭政,等.北山花岗岩在三轴压缩条件下的强度参数演化[J].*岩石力学与工程学报*,2017,36(7): 1599-1610.
- [11] 皇甫琪,李远,窦子豪,等.西鞍山花岗岩三轴压缩变形破坏与能量特征分析[J].*矿业研究与开发*,2016,36(7):82-85.
- [12] 王磊,李祖勇.西部弱胶结泥岩的三轴压缩试验分析[J].*长江科学院院报*,2016,33(8):86-90.
- [13] 张玉,徐卫亚,赵海斌,等.碎屑砂岩三轴压缩下强度和变形特性试验研究[J].*岩土力学*,2014,35(3):666-674.
- [14] 腾俊洋,唐建新,张宇宁,等.单轴压缩下层状含水页岩损伤破坏过程及特征[J].*岩土力学*,2017,38(6):1629-1638.
- [15] 张晋勋,杨昊,单仁亮,等.冻结饱水砂卵石三轴压缩强度试验研究[J].*岩土力学*,2018,39(11):3993-4000.
- [16] 苏承东,韦四江,杨玉顺,等.高温后粗砂岩常规三轴压缩变形与强度特征分析[J].*岩石力学与工程学报*,2015,34(s1):2792-2800.
- [17] 苏承东,付义胜.红砂岩三轴压缩变形与强度特征的试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2014,33(s1):3164-3169.
- [18] 赵延林,唐劲舟,王卫军,等.常规三轴压缩条件下茅口灰岩流固耦合破坏行为研究[J].*采矿与安全工程学报*,2018,35(1):205-212.