

# 干燥和饱水状态下砂岩力学特性试验

谭涛, 赵延林\*

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为研究饱水对岩石力学特性的影响,以干燥砂岩和饱水砂岩为研究对象,利用 MTS815 多功能岩石力学系统,对其进行 10,20,30 MPa 围压作用下的三轴压缩试验,得到干燥砂岩和饱水砂岩的偏应力-应变曲线和破坏形态,基于库伦准则,分析 2 种状态下砂岩的强度特征和变形特性.结果表明:随着围压的增大,干燥砂岩和饱水砂岩的峰值偏应力、残余偏应力、扩容起始偏应力、峰值轴向应变和体积应变不断增大,峰值侧向应变不断减小;在不同压缩阶段,饱水砂岩的内聚力和内摩擦角始终低于干燥砂岩;不同围压下,饱水砂岩破坏更为显著,其试件表面产生更多裂纹.

**关键词:**砂岩;三轴压缩试验;饱水;强度

**中图分类号:**TD452      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2022)01-0015-09

## Test of Sandstone's Mechanical Properties in Dry and Water-saturated State

TAN Tao, ZHAO Yanlin

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

**Abstract:** To study the water-saturated effect on rock mechanical properties, this paper takes the dry sandstone and water-saturated sandstone as the research object, uses the MTS815 multifunctional rock mechanics system to carry out the triaxial compression tests under 10, 20 and 30 MPa confining pressure. Deviatoric stress-strain curves and failure modes of dry sandstone and water-saturated sandstone are obtained. Based on the Coulomb criterion, the strength and deformation characteristics of sandstone in the two states are analyzed. Results show that with the increase of confining pressure, the peak deviatoric stress, residual deviatoric stress, initial deviatoric stress of expansion, peak axial strain and volumetric strain of dry and water-saturated sandstone increase continuously, while peak lateral strain decreases continuously. At different compression stages, the cohesion and internal friction angle of water-saturated sandstone are always lower than those of dry sandstone. The damage degree of water-saturated sandstone is more significant under different confining pressures, and more cracks appear on the surface of the specimens.

**Keywords:** sandstone; triaxial compression tests; water-saturated; strength

在隧道工程和采矿工程中,由于围岩的赋存条件,部分岩石会处于饱水状态.在岩石的饱水过程中,水-岩作用会对岩石造成损伤,并且饱水岩石内部孔隙和微裂纹中的水会进一步软化岩石,影响其力学性质.饱水岩石的力学特性是研究岩石与环境相互影响的一个重要基础.近年来,国内外学者对饱水岩石的力学特性、变形特征进行了大量研究,取得了丰富的成果.国内学者对大理岩<sup>[1-3]</sup>和花岗岩<sup>[4-6]</sup>进行了各种力学特性试验,发现水会弱化岩石的强度,降低岩石的内摩擦角和内聚力;刘建等<sup>[7]</sup>对干燥砂岩和饱水砂

收稿日期:2021-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774131)

\* 通信作者,E-mail:yanlin\_8@163.com

岩进行了单轴蠕变试验,发现与干燥砂岩相比,饱水砂岩更容易发生蠕变现象;李佳伟<sup>[8]</sup>、杨春和<sup>[9]</sup>、宋勇军<sup>[10]</sup>等通过三轴压缩试验,分析了水岩耦合作用下板岩的力学特性,并建立了力学参数预测模型;郭佳奇等<sup>[11]</sup>对自然状态和饱水状态下的岩溶灰岩进行单轴压缩和三轴压缩试验,从能量角度对两者的损伤破坏过程进行了研究,发现随着试件含水率的增加,其可释放应变能与总应变能的比值下降,且饱和试件的应变能释放率大于自然状态下试件的应变能释放率;于怀昌等<sup>[12]</sup>对干燥和饱水粉砂质泥岩进行了应力松弛试验,分析水对基本应力松弛参数的影响,并基于 Hooke-Kelvin 模型,建立了岩石的非线性应力松弛损伤模型.这些研究成果对研究饱水岩石的力学特性具有重要的参考价值.为了更加深入研究干燥和饱水岩石的强度变化规律和破坏特征,本文以干燥砂岩和饱水砂岩为研究对象,对其进行不同围压作用下的三轴压缩试验.

## 1 室内试验

### 1.1 试件的制备

试验所用砂岩取自河北马城铁矿砂岩含水层,该地区的砂岩在自然状态下长期处于饱水状态.该砂岩呈黄褐色,带有斑点,岩性为粗砂岩,主要成分为石英.将采集到的岩样制备成 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱体试件,如图 1 所示.按照水利水电工程岩石试验规程(SL/T 246—2020)<sup>[13]</sup>对试件进行饱水处理,并采用煮沸法强制饱水,测得砂岩试件的饱和吸水率在 6.56%左右.砂岩试件基本参数如表 1 所示.

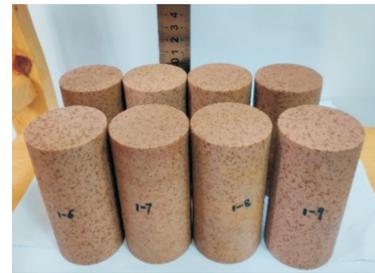


图 1 标准砂岩试件

表 1 砂岩试件基本参数

编号	高度/mm	直径/mm			干燥质量/g	饱水质量/g	饱和吸水率/%
		上部	中部	下部			
1	100.32	49.84	49.92	49.92	429.64		
2	100.36	49.82	49.82	49.82	430.96		
3	100.40	49.84	49.82	49.84	430.71		
4	100.30	49.86	49.78	49.84	430.03		
5	100.30	49.84	49.82	49.82	429.01		
6	100.40	49.82	49.84	49.82	430.64		
7	100.42	49.82	49.90	49.82	430.50	458.33	6.465
8	100.42	49.84	49.86	49.86	430.66	458.62	6.492
9	100.40	49.82	49.86	49.86	429.90	458.27	6.599
10	100.30	49.84	50.00	49.86	430.73	459.12	6.591
11	100.34	49.82	49.84	49.82	429.91	458.12	6.562
12	100.20	49.82	49.82	49.82	428.93	458.75	6.952

### 1.2 砂岩孔隙度测试

岩石孔隙度是岩体最基本的性质,本试验随机选取 3 个饱水砂岩试件,采用 AniMR-150 核磁共振分析仪测量砂岩试件的孔隙度.测得砂岩孔隙类型为管状,孔隙度为 14.23%~14.36%,如表 2 所示.

表 2 砂岩孔隙度测试结果

编号	体积/ $\text{cm}^3$	孔隙度/%
1#	196.35	14.36
2#	196.35	14.23
3#	196.35	14.24

砂岩核磁共振试验结果如图 2 所示.由图 2 可知 3 个砂岩试件的核磁共振结果比较接近,表明该岩样比较均质,离散性较小,符合试验要求.在图 2a 中,弛豫时间越长,说明砂岩内部的孔隙越大;信号强度越高,说明孔隙的数量越多.从图 2b 中可知,砂岩的孔径大小基本分布于  $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ ,主要为中孔和大孔.

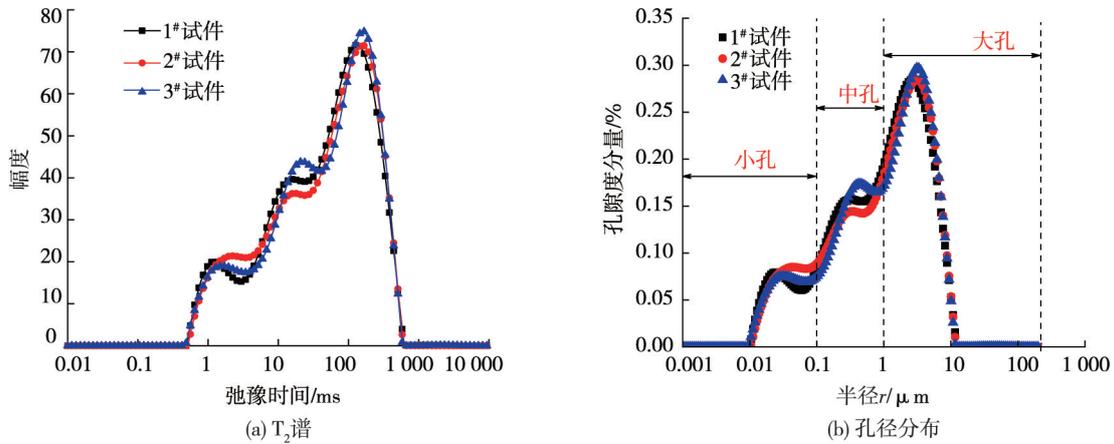


图 2 砂岩核磁共振试验结果

### 1.3 三轴压缩试验装置及方案

为研究饱水砂岩的力学特性,采用湖南科技大学 MTS815 多功能岩石力学测试系统(如图 3a 所示)对砂岩进行三轴压缩试验,具体操作步骤:

1) 首先将试件放置于 2 个同等直径的刚性压盘中间,用热缩管将试件及刚性压盘与试件接触部分包裹;然后用热风枪均匀吹动热缩管,使其与试件和上下刚性压盘充分接触,即接触面无明显气泡,为防止在试验过程中,三轴腔内部的白油进入试件内部对其造成额外破坏,用铁丝将上下 2 个刚性压盘与热缩管进一步固定;最后将试件放置于试验系统底座指定中心位置,安装好环向引伸计和轴向引伸计,如图 3b 所示.

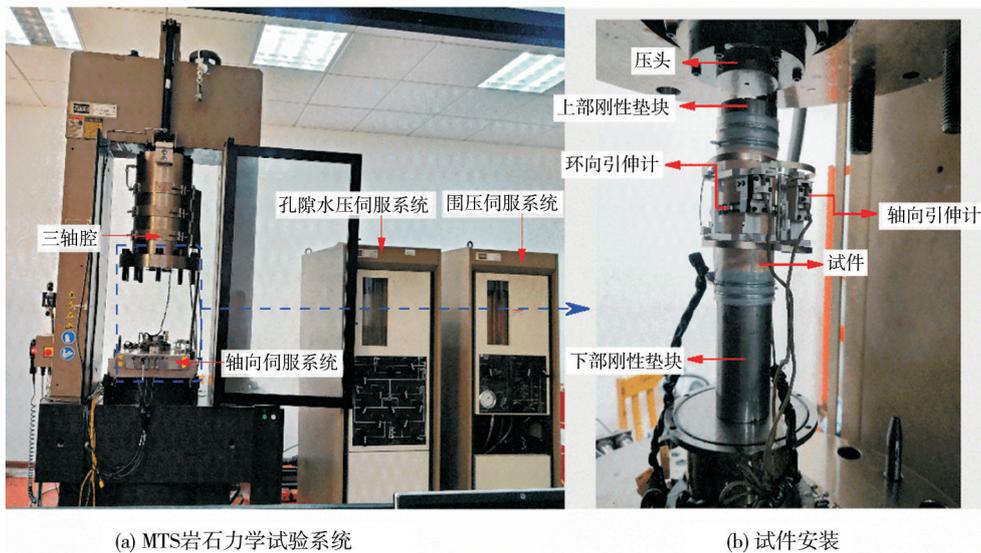


图 3 砂岩三轴压缩试验装置

2) 加载阶段,以  $2.0 \text{ MPa}/\text{min}$  的速度将围压和轴压加载至设定值,使其达到三轴静水压力状态( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ),维持 10 min.然后以轴向位移加载的方式进行偏应力加载,加载速率为  $0.1 \text{ mm}/\text{min}$  [14-15],直到试件破坏并达到残余阶段.试验加载路径示意图如图 4 所示.

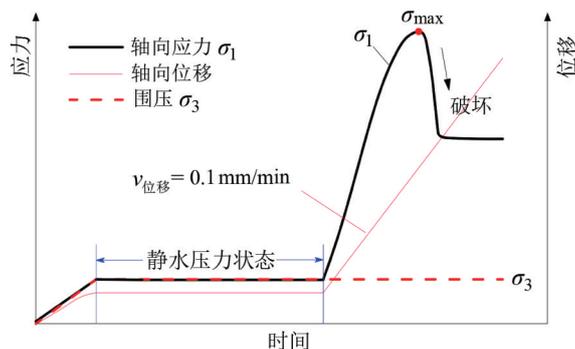


图 4 三轴试验加载路径

1.4 试验结果

三轴压缩试验得到的干燥砂岩和饱水砂岩的偏应力-应变曲线如图 5 所示.从图 5 中可知,对于干燥砂岩和饱水砂岩,在不同的围压作用下,试件的偏应力-轴向应变曲线的变化趋势大体一致,均经历了 5 个阶段<sup>[16-19]</sup>,即原生裂隙压密阶段、线弹性阶段、裂纹稳定发展阶段、裂纹非稳定发展阶段和峰值阶段.这表明饱水并不会改变其应力-应变曲线的发展趋势.在峰前阶段,随着轴向偏应力的增加,侧向应变速率逐渐增大;并在相同的偏应力下,随着围压的增大,侧向应变数值变小.这是由于围压会抑制砂岩的侧向变形,从而降低了侧向应变.当应力达到峰值强度时,随着应变的增大,其应力迅速下降,表明饱水无法改变砂岩的岩性,饱水砂岩和干燥砂岩均为脆性岩样.试验后期,在围压的作用下,随着应变的增大,砂岩的应力基本保持不变,此时对应的轴向应力为砂岩的残余强度.

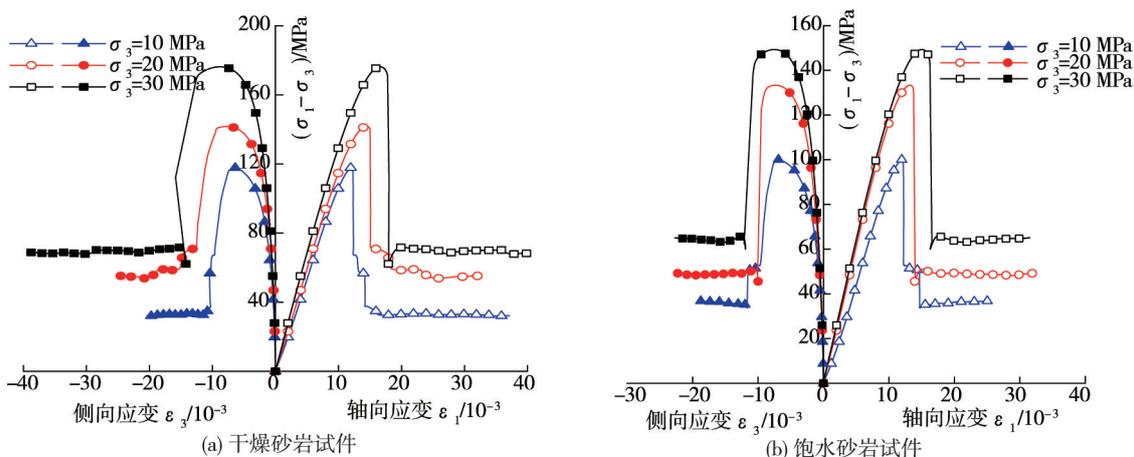


图 5 砂岩偏应力-应变曲线

岩石进入塑性变形后会发生体积扩容现象.在岩石的三轴压缩试验中,砂岩试件为标准圆柱形,其体积应变  $\varepsilon_v$  可由式(1)求得.

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

式中:  $\varepsilon_1, \varepsilon_3$  分别为试件的轴向应变和侧向应变.

根据式(1)计算,得到砂岩的体积应变-轴向应变曲线如图 6 所示.由图 6 可知,干燥砂岩和饱水砂岩的体积变形均经历体积压缩和体积膨胀阶段.体积压缩出现在试验加载初期,该阶段试件的体积应变随着轴向应变的增大而缓慢增大,然后出现一个“拐点”,此时试件的体积应变达到最大值;随着轴向应变的进一步增大,体积应变开始减小至 0.“拐点”对应的轴向应力为试件的起始扩容应力.在体积膨胀阶段,干燥砂岩在 10 MPa 围压作用下,其体积应变随着轴向应变的增大而增大,最后基本保持不变;在 20, 30 MPa 的围压下,其体积应变随着轴向应变的增大而减小.而饱水砂岩的体积应变在不同的围压下都随着轴向应变的增大呈现逐渐减小的趋势.

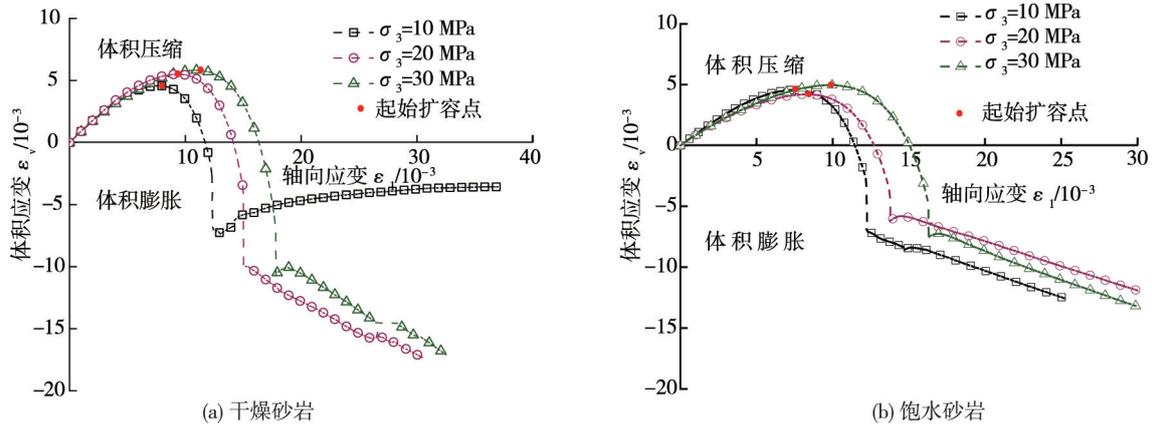


图 6 砂岩的体积应变-轴向应变曲线

三轴压缩过程中,试件的特征应力有峰值偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 、扩容起始偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ 和残余偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ ,特征应变有峰值偏应力对应的轴向应变 $\epsilon_{1,max}$ 、侧向应变 $\epsilon_{3,max}$ 和体积应变 $\epsilon_{v,max}$ .由图 5 和图 6 中的应力-应变曲线,可以得到干燥砂岩和饱水砂岩的特征应力和特征应变值,如表 3 所示.

表 3 砂岩试件的特征应力和特征应变值

试件状态	$\sigma_3/\text{MPa}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}/\text{MPa}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_d/\text{MPa}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_r/\text{MPa}$	$\epsilon_{1,max}$	$\epsilon_{3,max}$	$\epsilon_{v,max}$
干燥砂岩	10	117.88	84.11	32.67	0.012 05	-0.006 63	-0.001 20
	20	141.72	108.10	55.12	0.014 40	-0.007 68	-0.000 95
	30	176.29	138.83	68.29	0.016 60	-0.008 72	-0.000 84
饱水砂岩	10	100.16	69.58	36.21	0.012 07	-0.007 16	-0.002 25
	20	133.35	100.68	48.41	0.013 20	-0.007 33	-0.001 46
	30	149.33	118.21	64.69	0.015 04	-0.007 51	0.000 01

为了进一步分析不同饱水状态下,砂岩相关力学参数与围压的关系,根据表 3 的数据绘制散点图,如图 7 所示.

由图 7 可知:在 10,20,30 MPa 的围压下,干燥砂岩的峰值偏应力和起始扩容偏应力均大于饱水砂岩的峰值偏应力和起始扩容偏应力;当围压为 20,30 MPa 时,干燥砂岩残余偏应力大于饱水砂岩的残余偏应力;砂岩在干燥和饱水 2 种情况下,砂岩的峰值偏应力、起始扩容偏应力和残余偏应力与围压呈线性正相关关系,均随围压的增大而增大,但干燥砂岩的增长速度明显高于饱水砂岩.

分别对 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 与 $\sigma_3$ 的关系进行线性拟合(如图 7a~图 7c 所示),得到拟合关系式:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} = k_1 \sigma_3 + d_1; \tag{2}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_d = k_2 \sigma_3 + d_2; \tag{3}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_r = k_3 \sigma_3 + d_3; \tag{4}$$

式中: $k_1, d_1, k_2, d_2, k_3, d_3$  均为拟合系数.

无论是干燥砂岩还是饱水砂岩,砂岩的峰值强度、起始扩容应力、残余强度与围压拟合的相关系数均大于 0.96,这表明使用式(2)~式(4)分别表达砂岩的峰值偏应力、起始扩容偏应力以及残余偏应力与围压的关系是合理可靠的.

从图 7d 可以发现,在不同围压作用下,干燥砂岩的峰值轴向应变始终高于饱水砂岩的轴向应变,且都随着围压的增大而增大.由图 7e 和图 7f 可知,在 10 MPa 的围压下,干燥砂岩的峰值侧向应变大于饱水砂岩侧向应变,当围压为 20,30 MPa 时,干燥砂岩的峰值侧向应变小于饱水砂岩的峰值侧向应变,其峰值侧向应变随着围压的增大而减小,而体积应变随着围压的增大而增大.

对砂岩峰值应变与围压的关系进行线性拟合(如图 7e~图 7g 所示),发现砂岩的峰值轴向应变、峰值

侧向应变、峰值体积应变与围压分别存在关系：

$$\varepsilon_{1,\max} = k_4 \sigma_3 + d_4; \tag{5}$$

$$\varepsilon_{3,\max} = k_5 \sigma_3 + d_5; \tag{6}$$

$$\varepsilon_{v,\max} = k_6 \sigma_3 + d_6; \tag{7}$$

式中： $k_4, d_4, k_5, d_5, k_6, d_6$  为拟合系数。

饱水砂岩和干燥砂岩的峰值应变与围压的关系拟合的相关系数均大于 0.95, 这表明用式(5)~式(7)表示砂岩的峰值应变与围压的关系是合理的。

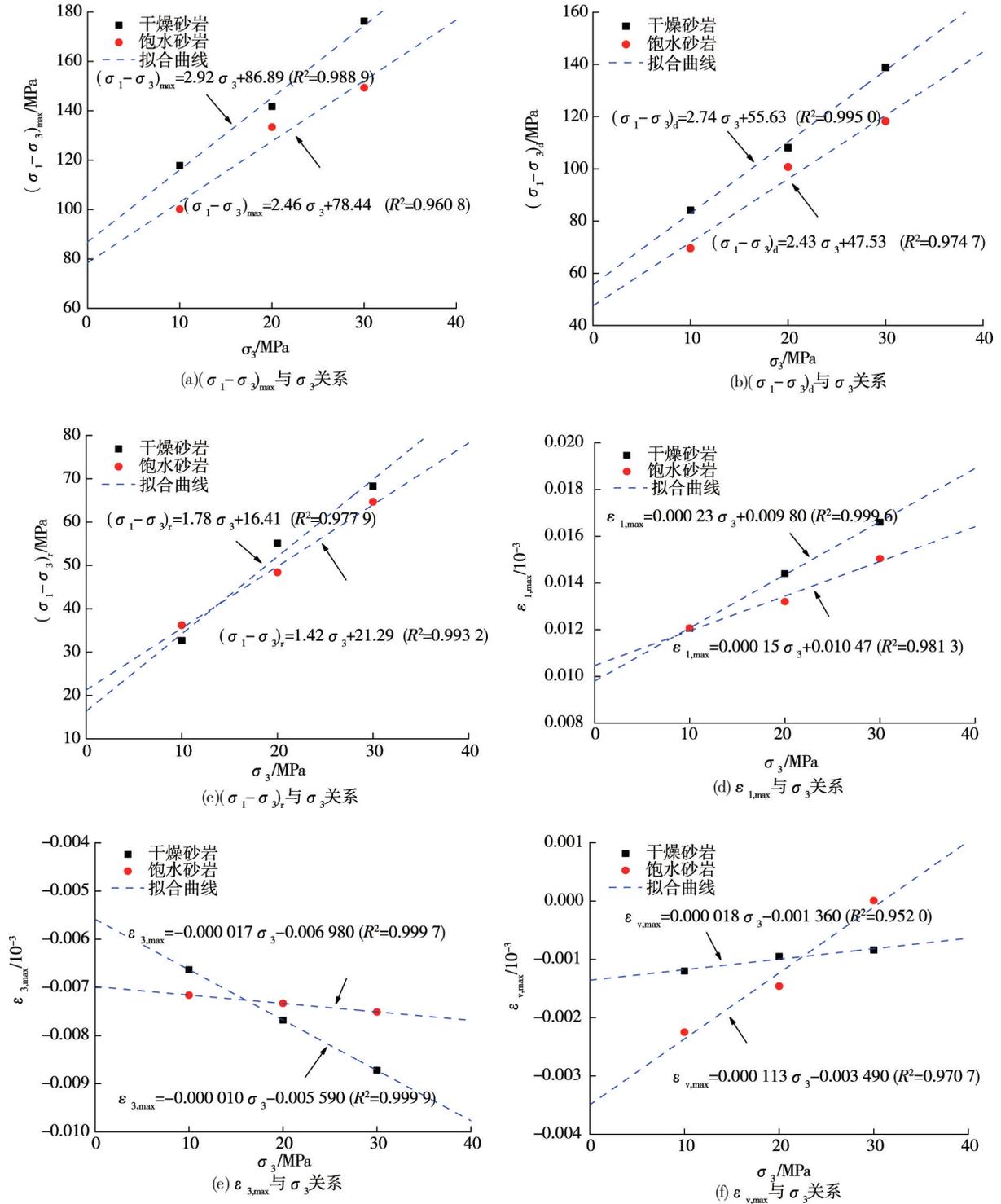


图 7 干燥和饱水砂岩相关力学参数随围压变化关系

## 2 砂岩强度与围压的关系分析

### 2.1 基于莫尔-库伦准则的砂岩强度与围压关系

在三轴压缩试验中,砂岩的峰值强度  $\sigma_p$  等于峰值偏应力与围压之和,即

$$\sigma_p = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} + \sigma_3, \quad (8)$$

结合式(2)和式(8),可以得到砂岩的峰值强度与围压的关系式,即

$$\sigma_p = (k_1 + 1) \sigma_3 + d_1. \quad (9)$$

同理可以得到砂岩的起始扩容应力  $\sigma_d$  和残余强度  $\sigma_r$  与围压的关系式,即

$$\sigma_d = (k_2 + 1) \sigma_3 + d_2; \quad (10)$$

$$\sigma_r = (k_3 + 1) \sigma_3 + d_3. \quad (11)$$

根据库伦准则,岩石的剪切强度准则为

$$|\tau| = c + \sigma \tan \varphi. \quad (12)$$

式中: $\tau$  为剪切面上的剪应力; $\sigma$  为剪切面上的正应力; $c$  为内聚力; $\varphi$  为内摩擦角.

库伦准则可以用莫尔极限应力圆表示,如图8所示.

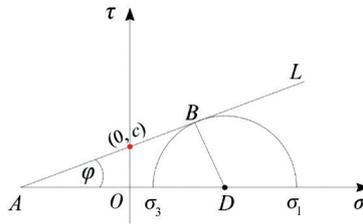


图8  $\tau$ - $\sigma$  坐标下的库伦准则

式(12)的几何意义可以由图8中的直线AL表示,其斜率为内摩擦角的正切值,截距为内聚力  $c$ .对应图8可以得到库伦准则的主应力表达式:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta; \\ \tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta. \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\theta$  为岩石的断裂角,且  $2\theta = \frac{\pi}{2} + \varphi$ .

将式(13)代入式(12)可得

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (14)$$

此外,定义砂岩在峰后残余阶段的内聚力为残余内聚力  $c_r$ ,内摩擦角为残余内摩擦角  $\varphi_r$ ,同理可得残余强度  $\sigma_r$  与围压  $\sigma_3$  的关系:

$$\sigma_r = \frac{1 + \sin \varphi_r}{1 - \sin \varphi_r} \sigma_3 + \frac{2c_r \cos \varphi_r}{1 - \sin \varphi_r}. \quad (15)$$

联立式(9)和式(14)可以得到

$$\varphi = \arcsin \frac{k_1}{2 + k_1}; \quad (16)$$

$$c = \frac{d_1}{\cos \varphi (2 + k_1)}. \quad (17)$$

将图7中的拟合系数数值代入式(16)和式(17),可以得到砂岩的内聚力和内摩擦角.同理可以得到

砂岩残余阶段的内摩擦角和内聚力,如表4所示.从表4中可以发现,饱水砂岩在不同阶段的内聚力和内摩擦角均小于干燥砂岩.

表4 砂岩试件的内摩擦角和内聚力

砂岩试件	$\varphi/(\circ)$	$c/\text{MPa}$	$\varphi_r/(\circ)$	$c_r/\text{MPa}$
干燥砂岩	36.4	21.95	28.1	7.00
饱水砂岩	33.5	21.07	24.5	6.85

## 2.2 砂岩强度软化系数

为分析在三轴压缩试验中干燥和饱水状态下砂岩强度的变化,定义峰值强度软化系数为  $K_p$ , 起始扩容应力的软化系数为  $K_d$ , 残余强度的软化系数为  $K_r$ , 其计算公式为

$$\begin{cases} K_p = 1 - \frac{\sigma_p^w}{\sigma_p^d}; \\ K_d = 1 - \frac{\sigma_d^w}{\sigma_d^d}; \\ K_r = 1 - \frac{\sigma_r^w}{\sigma_r^d}. \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\sigma_p^w, \sigma_d^w, \sigma_r^w$  分别为饱水砂岩的峰值强度、起始扩容应力和残余强度;  $\sigma_p^d, \sigma_d^d, \sigma_r^d$  分别为干燥砂岩的峰值强度、起始扩容应力和残余强度.

根据式(18)可以得到砂岩的强度软化系数,如图9所示.从图9可知,砂岩的强度软化系数随着围压增加而上下波动.试件的峰值强度和起始扩容应力的软化系数相差不大,在10 MPa围压下,峰值强度软化系数和起始扩容应力软化系数达到最大值,分别为0.139和0.154;在20 MPa围压下影响最弱,其软化系数分别为0.052和0.058.在峰后残余阶段,砂岩残余强度的软化系数变化较大,其波动范围为-0.083~0.089.这表明饱水对砂岩强度的弱化作用会随着围压的变化而变化.

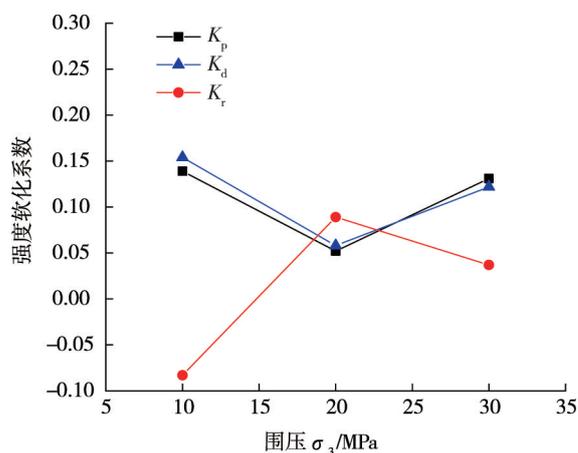


图9 不同围压下饱水前后砂岩强度软化系数

## 3 破坏模式

不同围压下,干燥砂岩和饱水砂岩的破坏形态如图10和图11所示.

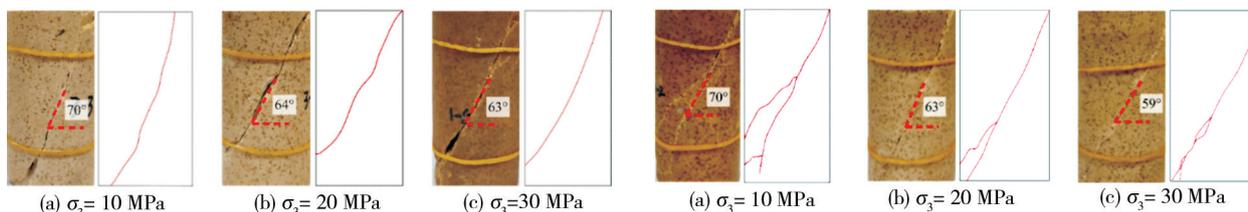


图10 干燥砂岩破坏形态

图11 饱水砂岩破坏形态

从图10可知:在不同的围压作用下,干燥砂岩的破坏形态均为单斜面剪切破坏,裂纹为剪切裂纹.这是因为该砂岩具有明显的矿物颗粒,由于矿物颗粒间的黏结强度较低,进而出现单一的剪切面;又因为砂岩试件与试验仪器的垫块之间的接触面存在摩擦作用<sup>[20]</sup>,砂岩试件出现从端部开始自上而下的对角破坏.此外,可以发现随着围压的增大,试件的破裂角从70°减小至63°.

从图11可以看出:不同围压作用下,饱水砂岩的破坏形态以单斜面剪切破坏为主,试件产生一条从上

到下的斜剪切主裂纹,也出现了次生的剪切裂纹.饱水砂岩的破裂角随着围压的增大而减小,与干燥砂岩一致.

比较图 10 和图 11 可以发现:在 10 MPa 的围压下,两者的破裂角相等;随着围压的增大(围压为 20 MPa 和 30 MPa),饱水砂岩的破裂角均小于干燥砂岩的破裂角.总体上,饱水对砂岩试件的破坏形态造成了较大的影响,而且降低了砂岩的破裂角.

## 4 结论

1) 干燥和饱水砂岩的强度特征与变形特性都受到围压影响,它们的峰值偏应力、起始扩容偏应力、残余偏应力、峰值轴向应变和峰值体积应变与围压呈正相关关系,而峰值侧向应变与围压呈负相关关系.

2) 饱水会降低砂岩在不同阶段的内聚力和内摩擦角,使得饱水砂岩的峰值强度、起始扩容应力和残余强度均低于干燥砂岩的强度.此外,饱水对砂岩的弱化作用受到围压的影响,砂岩的峰值强度和起始扩容应力在 10 MPa 围压下弱化最大,而残余强度在 20 MPa 的围压下饱水的弱化作用最为显著.

3) 干燥砂岩和饱水砂岩的破裂角均随着围压的增大而减小.但是由于水对岩石的腐蚀作用,与干燥砂岩的单斜面剪切破坏相比,饱水砂岩的破坏模式更为复杂,其主剪切破坏面附近出现了次生剪切裂纹.

## 参考文献:

- [1] 陈钢林,周仁德.水对受力岩石变形破坏宏观力学效应的实验研究[J].地球物理学报,1991(3):335-342.
- [2] 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,2005,26(3):475-478.
- [3] 杨圣奇,徐卫亚,谢守益,等.饱和状态下硬岩三轴流变变形与破裂机制研究[J].岩土工程学报,2006,28(8):962-969.
- [4] 罗丹旒,苏国韶,何保焜.不同饱水度花岗岩的真三轴岩爆试验研究[J].岩土力学,2019,40(4):1331-1340.
- [5] 李铀,朱维申,白世伟,等.风干与饱水状态下花岗岩单轴流变特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003(10):1673-1677.
- [6] 陈旭,俞缙,李宏,等.不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J].岩土力学,2013,34(9):2527-2533.
- [7] 刘建,李鹏,乔丽苹,等.砂岩蠕变特性的水物理化学作用效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12):2540-2550.
- [8] 李佳伟,徐进,王璐,等.砂板岩岩体力学特性的水岩耦合试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(3):599-604.
- [9] 杨春和,冒海军,王学潮,等.板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J].岩土力学,2006,27(12):2090-2098.
- [10] 宋勇军,雷胜友,毛正君,等.干燥和饱水状态下炭质板岩力学特性试验[J].煤炭科学技术,2014,42(10):48-52.
- [11] 郭佳奇,刘希亮,乔春生.自然与饱水状态下岩溶灰岩力学性质及能量机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2):296-308.
- [12] 于怀昌,赵阳,刘汉东,等.三轴应力作用下水对岩石应力松弛特性影响作用试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):313-322.
- [13] 中华人民共和国水利部.水利水电工程岩石试验规程:SL/T 246—2020[S].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [14] 赵延林,廖健,刘强,等.水-力耦合和隔离状态下孔道砂岩力学特性的对比[J].煤炭学报,2020,45(12):3973-3983.
- [15] 赵延林,刘强,刘欢,等.水-力耦合作用下单裂隙灰岩三轴压缩与声发射试验及压剪断裂模型[J].煤炭学报,2021,46(12):3855-3868.
- [16] BIENIAWSKI Z T. Mechanism of brittle fracture of rock: Parts I, II and III[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1967, 4(4): 395-406.
- [17] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1994,31(6):643-659.
- [18] GOKTAN R M, YILMAZ N G. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting efficiency[J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005,105(10):727-732.
- [19] CHEN X, YU J, TANG C A, et al. Experimental and numerical investigation of permeability evolution with damage of sandstone under triaxial compression[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2017,50(6):1529-1549.
- [20] 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.