

DOI: 10.11779/CJGE201806021

不同初始卸荷水平和水压下砂岩卸荷力学特性试验研究

刘新荣^{1, 3}, 刘俊^{1, 2, 3}, 冯昊^{1, 3}, 杜立兵^{1, 3}, 何春梅^{1, 3}, 钟祖良^{1, 3}

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中铁十一局集团第五工程有限公司, 重庆 400037;

3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 深部岩石所处的不同初始卸荷水平状态及水压环境对其力学特性影响明显, 基于对砂岩进行常规三轴加载试验、不同初始卸荷水平及水压条件的卸荷试验, 研究了卸荷条件下砂岩的极限强度、变形特征、变形损伤以及卸荷抗剪强度。研究表明: 初始卸荷水平 n 一定时, 随着水压 p 的增加, 卸荷极限强度的降低呈现先快后慢的规律, 岩样更容易发生破坏, 脆性特征更明显, 损伤变量 ω 也呈增加趋势; 当水压 p 一定时, 随着 n 的增大, 卸荷极限强度线性增大, 统一围压降参数 η 线性降低, 损伤变量 ω 也减少, 且 n 从 0.9 到 1.0 的过程中, ω 降低更明显。综合初始卸荷水平 n 和水压 p 的影响, 对摩擦角和黏聚力进行了二元函数拟合, 利用该拟合公式可以预测不同 n , p 条件下的黏聚力和摩擦角, 具有一定工程意义。并基于对试验数据的拟合, 对不同 n , p 作用下的砂岩 Mohr-Coulomb 准则表达式进行了修正。

关键词: 初始卸荷水平; 卸围压; 水压; 扩容; 卸荷抗剪强度

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)06-1143-09

作者简介: 刘新荣(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学、边坡、隧道与地下空间工程等方面的教学与科研工作。E-mail: liuxrong@126.com。

Experimental research on unloading mechanical properties of sandstone under different initial unloading levels and pore pressures

LIU Xin-rong^{1, 3}, LIU Jun^{1, 2, 3}, FENG Hao^{1, 3}, DU Li-bing^{1, 3}, HE Chun-mei^{1, 3}, ZHONG Zu-liang^{1, 3}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. The 5th

Engineering Ltd. of the 11th Engineering Bureau of China Railway, Chongqing 400037, China; 3. College of Civil Engineering,

Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The mechanical properties of deep rocks are obviously affected by the initial unloading level and water pressure environment. By carrying out triaxial compression tests and unloading tests on sandstone under different initial unloading levels and pore pressures, the ultimate strength, deformation characteristics, deformation damage and shear strength under unloading are studied. The test results show that when the initial unloading level n is kept to be constant, with the increase of pore pressure p , the ultimate strength under unloading decreases quickly first then slowly. The rock is more prone to damage, more brittle, and the damage variable increases. When the pore pressure p is kept to be constant, with the increase of the initial unloading level n , the ultimate strength under unloading increases linearly and the uniform decreasing increment of confining pressure η decreases linearly too. The damage variable decreases, especially when n is from 0.9 to 1 of the process, and ω reduction is more pronounced. Considering the influences of the initial unloading level n and pore pressure p , the friction angle and cohesion are fitted by the binary function. It has a certain engineering significance that the values of cohesion and friction angle under the condition of different n and p can be predicted by the fitting formula. And based on the fitting of the experimental data, the expression of Mohr-Coulomb yielding criterion for the sandstone under different initial unloading levels n and pore pressures p is modified.

Key words: initial unloading level; unloading confining pressure; pore pressure; dilatancy; unloading shear strength

基金项目: 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项重点研发项目 (cstc2017shms-zdyf0412); 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研究课题 (2011DA105287—MS201208); 重庆市科委自然科学基金基础与前沿研究计划项目 (cstc2013jcyjA30005)

收稿日期: 2017-02-23

***通讯作者** (E-mail: ljcreate@qq.com)

0 引言

随着国内大型水电站陆续在高山峡谷地区修建,

水压作用下岩体开挖引起的卸荷问题越来越受到关注,例如拉西瓦、锦屏水电站的引水隧洞、三峡船闸高边坡、雅砻江锦屏 I 级高边坡的开挖建设等。从本质上讲,岩体开挖是一种应力卸荷过程,其机制与加载有较大区别。因此有必要深入研究水压作用下岩体的卸荷力学特性。

近年来卸荷力学的研究得到了较大的发展,越来越多的学者也对水压作用下的岩石卸荷力学展开了研究。唐浩等^[1]利用 MTS815 研究了水力作用下岩石的非连续性演化,揭示了水力作用下砂岩扩容的强烈及突发性。陈秀铜等^[2]对高应力高水压下的砂岩、板岩、大理岩进行了不同路径下的卸荷试验,研究发现卸荷条件下岩石的摩擦角和黏聚力都有大幅度降低。梁宁慧等^[3]、Liu 等^[24]对卸荷条件下的裂隙砂岩展开了研究,发现裂隙岩体渗透系数与卸荷量服从双曲线关系,且发现加卸载过程中渗透的迟滞效应。邢福东等^[5]、李志敬等^[6]取锦屏水电站引水隧洞的岩石展开了高应力高水压下岩石力学特性研究,发现高孔隙水压力加速了岩石的脆裂,降低了强度。

另一方面,不同的卸荷方式将会较大的影响岩石的力学特性。以往的研究主要从不同的卸荷路径进行分析,对于三轴卸荷试验主要包括^[7]:① σ_1 不变,卸载 σ_3 ;②降 σ_1 ,同时卸 σ_3 ;③增 σ_1 ,同时卸 σ_3 。此外,黄润秋等^[8]、王在泉等^[9]从卸荷速率的大小对岩石力学特性的影响展开研究。然而这些研究都较少考虑初始卸荷水平的影响,初始卸荷水平用岩石受载的轴向应力水平与岩石对应条件下峰值强度的比率来表征^[10],前人开展卸荷试验对“初始卸荷点”的选取约为三轴压缩强度的 70%~80%,然而不同的开挖方式、开挖进度、支护方法等都会引起岩石的初始卸荷水平的不同,卸荷条件下的力学特性也会有较大差异,因此对初始卸荷水平的研究具有较大的实际意义。虽然邱士利等^[11]、周科平等^[12]分别从宏观和微观对不同初始卸荷水平下的卸荷试验展开研究,获得了有意义的结论。但相关研究还很少,因此,有必要对该方面的研究展开进一步的分析。

鉴于初始卸荷水平和水压对深部岩体卸荷力学特征认知的重要性以及对深部工程灾害防治的重要意义,本文通过室内三轴加载试验、不同初始卸荷水平及水压条件的卸荷试验,较详细的研究了卸荷条件下砂岩的极限强度、变形特征、变形损伤以及卸荷抗剪强度。研究结果对高应力高水压作用下岩石的卸荷破坏灾害防治有一定参考价值。

1 试验方案

1.1 试验岩样及仪器

本次试验所选取的岩样薄片鉴定结果为中-细粒长石砂岩,绿灰色,显微结构描述为中-细粒砂状结构,块状构造,孔隙式胶结。同时,对砂岩岩样粉末进行了 XRD 的分析(采用仪器为 PANalytical X' Pert Powder),分析结果见图 1,通过综合分析,砂岩岩样中的矿物含量见表 1。

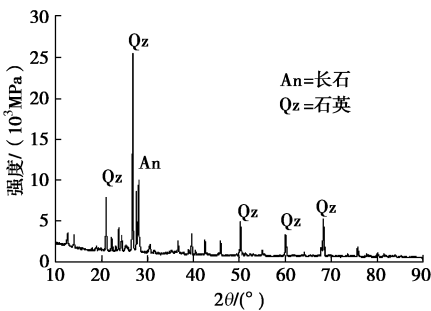


图 1 砂岩 X 射线衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction spectra of sandstone

表 1 砂岩岩样矿物含量

Table 1 Mineral content of sandstone

矿物	岩屑物				填隙物
	石英	长石	岩屑	云母	黏土质(绿泥石)
含量/%	50	40	5	1	4

将岩样加工成直径 $D=50\text{ mm}$, 高度 $H=100\text{ mm}$ 的圆柱形试样,试验前采用 SRH 型智能混凝土真空饱水机对所有试样进行真空饱和。三轴试验在重庆大学 B 区岩土实验楼的“岩石多场耦合三轴仪”系统上完成,该仪器由法国里尔科技大学研发,仪器见图 2。



图 2 岩石多场耦合三轴仪

Fig. 2 Multi-field coupling triaxial instrument for rock

1.2 试验方法

深部岩体开挖为三向应力状态,开挖过程为典型的卸荷过程。室内试验为尽可能准确模拟工程开挖,采用 σ_1 升高, σ_3 降低的方式,围压卸载采用应力控制,轴压采用位移控制^[13]。

本试验的试验步骤:①以 1 MPa/min 的加载速率加载围压到预定值(15, 25, 35 和 45 MPa);②达到

设定值后, 施加渗透压差, 进水口压力设定为 0, 1, 4, 7 MPa 的水压, 出水口压力为大气压。当出水口有水流出 (这个过程会持续 3~8 h 不等), 保证岩样完全饱和后方可进行下一步操作; ③以 0.02 mm/min 的速率分别施加轴压至三轴压缩峰值强度的 70%, 80% 和 90% (称为不同初始卸荷水平), 随后以 2 MPa/min 的速率降围压, 轴压以适当的应变控制速率继续加载; ④岩样破坏结束卸围压, 并保持该围压, 继续施加轴向应力直至应变不随其增加而降低, 试验结束。

2 试验结果分析

2.1 卸荷极限强度特征分析

不同初始卸荷水平及渗透水压下对砂岩强度参数影响较大, 试验结果见表 2。根据表 2, 观察砂岩卸荷极限强度与初始卸荷水平、水压的关系, 对表 2 中的试验数据进行拟合, 可以发现砂岩的卸荷极限强度与初始卸荷水平 n 、渗透水压 p 满足如下二元函数关系:

$$\sigma_{u,f} = a \cdot n \ln(p+1) + b \ln(p+1) + c \cdot n + d \quad , \quad (1)$$

式中, $\sigma_{u,f}$ 为岩样的卸荷极限强度, p 为水压, n 为初始卸荷水平 ($n \leq 1$), a, b, c, d 为回归参数。拟合曲面如图 3, 相应的拟合系数值及 R^2 见表 3, 各相关系数都大于 0.944, 由此可见, 砂岩的卸荷极限强度与初始卸荷水平 n 、水压 p 的函数关系式是合理的。且可通过此二元函数中初始卸荷水平 n 及水压 p 的值, 预测不同 n, p 下的卸荷极限强度, 有较好的工程意义。

表 2 不同初始卸荷水平下及水压下三轴卸荷试验结果

Table 2 Results of triaxial unloading tests under different initial unloading levels and pore pressures

试验方案	初始围压 σ_3^0 /MPa	水压 /MPa	极限强度 /MPa	卸荷起始应力 /MPa	卸荷后围压 σ_3 /MPa	$\frac{\Delta\sigma_3}{\sigma_3^0}$ /%
方案 1 (70% 卸荷)	15	0	81.15	70.59	10.15	32.3
		1	77.16	65.45	10.80	28.0
		4	75.80	63.00	11.50	23.3
	25	0	108.97	89.10	14.80	40.8
		1	98.18	85.56	15.90	36.4
		4	95.80	80.77	16.00	36.0
		7	88.72	73.04	16.80	32.8
	35	0	122.35	101.75	20.70	40.9
		1	113.30	98.00	21.80	37.7
		4	110.02	94.50	22.20	36.6
		7	104.38	89.65	23.20	33.7
	45	0	139.27	112.60	23.50	47.8
		1	131.81	108.64	24.80	44.9
		4	124.68	104.02	25.50	43.3
		7	119.99	99.96	27.70	38.4

方案 2 (80% 卸荷)	15	0	88.20	80.67	10.80	28.0
		1	82.99	74.80	11.80	21.3
		4	80.21	72.00	13.00	13.3
	25	0	113.69	101.83	16.80	32.8
		1	108.08	97.78	17.10	31.6
		4	104.13	92.31	17.50	30.0
		7	92.02	83.47	17.70	29.2
	35	0	129.46	116.29	21.75	37.9
		1	123.10	112.00	23.00	34.3
		4	122.81	108.00	23.50	32.9
		7	116.83	102.46	24.00	31.4
	45	0	144.85	128.68	28.10	37.6
		1	138.71	124.16	26.90	40.2
		4	132.45	118.88	31.00	31.1
		7	125.47	114.24	30.90	31.3
方案 3 (90% 卸荷)	15	0	94.51	90.75	11.60	22.7
		1	87.09	84.15	12.20	18.7
		4	84.02	81.00	12.80	14.7
	25	0	122.16	114.56	18.70	25.2
		1	113.84	110.00	20.00	20.0
		4	108.27	103.85	21.00	16.0
		7	99.52	93.91	21.50	14.0
	35	0	134.38	130.82	25.60	26.9
		1	130.09	126.00	22.45	35.9
		4	127.14	121.50	24.30	30.6
		7	123.46	115.27	25.20	28.0
	45	0	149.80	144.77	32.20	28.4
		1	143.48	139.68	31.00	31.1
		4	139.01	133.74	33.30	26.0
		7	130.99	128.52	34.40	23.6

表 3 卸荷极限强度与水压 p 和初始卸荷水平 n 拟合系数

Table 3 Fitting coefficients of unloading ultimate strength and pore pressure p , initial unloading level n

初始围压 /MPa	a	b	c	d	R^2
15	-15.64	7.70	64.51	35.55	0.9631
25	-7.16	-3.57	72.99	56.24	0.9440
35	14.72	-17.74	65.15	75.86	0.9519
45	3.77	-11.75	55.28	100.40	0.9831

且从图 3 中可知, 初始卸荷水平 n 一定时, 随着水压的增加, 卸荷极限强度的降低呈现先快后慢的规律, 可能是因为前期虽进行了充分的饱和处理, 岩样仍有一部分区域未完全浸水, 随着水压的增大, 岩样内部全部充满了水。水压 p 一定时, 随着初始水平 n 的降低, 卸荷极限强度线性减小, 这是因为 n 越小, 岩样越早进入卸围压状态, 最终围压越小。

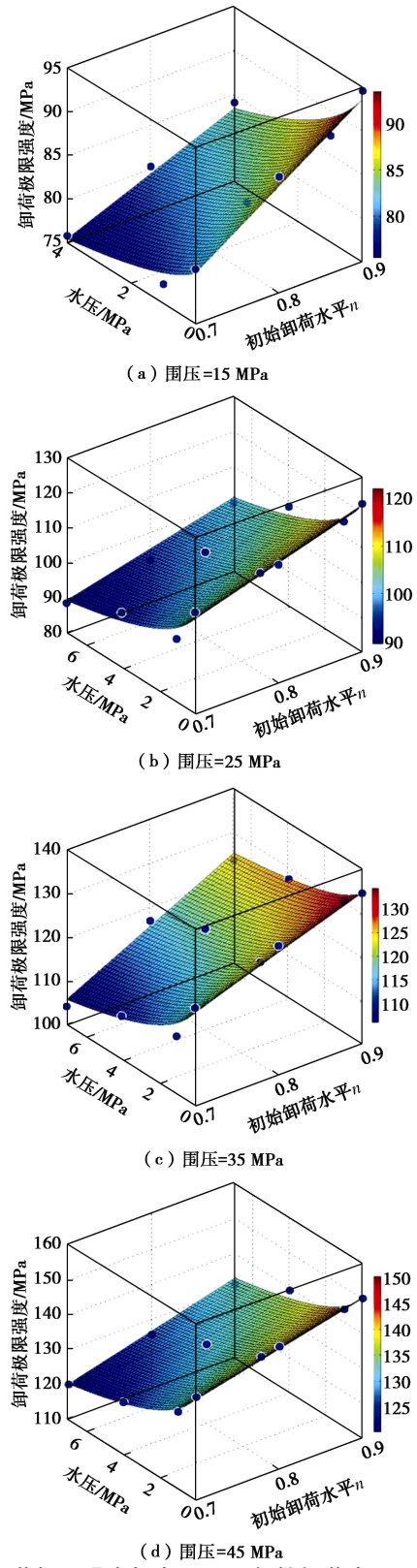


图3 卸荷极限强度与水压 p 和初始卸荷水平 n 的关系
Fig. 3 Relationship among unloading ultimate strength, pore pressure p and initial unloading level n

2.2 统一围压降参数 η 分析

为了更好的分析卸围压与不同初始卸荷水平 n 、水压 p 的关系，拟定一个变量——“统一围压降参数 η ”表示为

$$\eta = \frac{\Delta\sigma_3}{\sigma_3^0}, \quad (2)$$

式中， $\Delta\sigma_3$ 为岩样卸荷过程中围压的降低值， σ_3^0 为岩样的初始围压，利用“统一围压降参数 η ”可分析不同初始卸荷水平 n 及水压 p 下初始围压的降低程度值，见图 4。

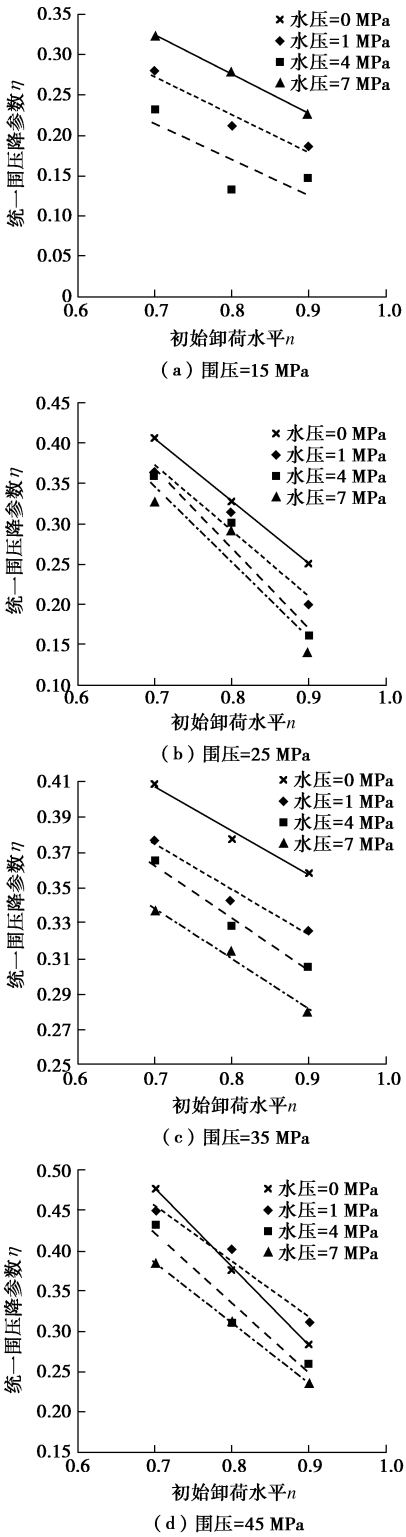


图4 统一围压降参数 η 与水压 p 和初始卸荷水平 n 的关系
Fig. 4 Relationship among uniform decreasing increment of confining pressure η , pore pressure and initial unloading level

由图4可知:①水压 p 一定时,统一围压降参数 η 基本都是随着初始卸荷水平 n 的提高而线性降低的,说明初始卸荷水平越高,岩样达到破坏所经历的卸围压过程越短,围压卸荷量越小。②初始卸荷水平 n 一定时,随着水压 p 的增大,统一围压降参数 η 降低,岩样的围压卸荷量减小,即岩样更容易发生破坏,说明随着水压的增大,岩样的脆性特征增强了。③从图中的趋势线可推测,当初始卸荷水平 n 接近1时,统一围压降参数趋近于0,也即不需要卸围压岩样将会发生破坏,虽然在卸荷试验中,峰值后到应力急剧跌落阶段仍在卸围压,与三轴加载试验略有不同,但初始卸荷水平为1的卸荷试验无限接近于常规三轴压缩试验,因此,可将常规三轴试验作为特殊的卸荷试验过程,这在文献[10]有相关论述。

2.3 卸荷变形特征分析

(1) 应变增量分析

对于不同初始卸荷水平的三轴试验,可从卸荷起始点到残余阶段分为3个阶段^[13],由于第一阶段的起始点卸荷点不同,不易对比,而第三阶段为加载过程,因此本文只研究第二阶段的卸荷过程。由于在各个围压下的规律较为类似,此处只列出围压为25, 35 MPa时第二阶段的轴向应变增量 $\Delta\epsilon_1$ 和侧向应变增量 $\Delta\epsilon_3$,见图5。

由图5可知:

a) 整个阶段二的轴向应变增量 $\Delta\epsilon_1$ 较小,当初始卸荷水平 n 一定时,随着水压 p 的增大, $\Delta\epsilon_1$ 都呈减小趋势,说明水压的增大会使得岩样更容易发生脆性破坏。当水压 p 一定时,随着初始卸荷水平 n 的降低,岩石更容易发生脆性破坏。这是因为如果初始卸荷越高,岩石生成的微裂隙越发育,表现出延性特征越明显。围压为25, 35 MPa时,轴向应变增量 $\Delta\epsilon_1$ 的值分别在0.1625%~0.3364%之间和0.2247%~0.3567%之间。

b) 侧向应变增量 $\Delta\epsilon_3$ 相对较大,当初始卸荷水平 n 一定时,随着水压 p 的增大, $\Delta\epsilon_3$ 的变化规律正好与 $\Delta\epsilon_1$ 相反,其值是呈增大的趋势,说明水压力的增大对加速岩样扩容的作用。当水压 p 一定时,随着初始卸荷水平 n 的降低, $\Delta\epsilon_3$ 有增大的趋势。这是因为初始卸荷水平越低,岩样越早进入卸围压的阶段,限制岩样侧向变形的围压越小,岩石有更多的空间可侧向变形。围压为25, 35 MPa时, $\Delta\epsilon_3$ 的值分别为1.2197%~2.8754%和1.2634%~2.3765%。 $\Delta\epsilon_3$ 分别是 $\Delta\epsilon_1$ 的3.6~17.7倍和3.5~10.6倍,且发现对于初始卸荷水平 n 越低、水压 p 越大的情况,侧向变形增加的倍数比轴向变形更大。

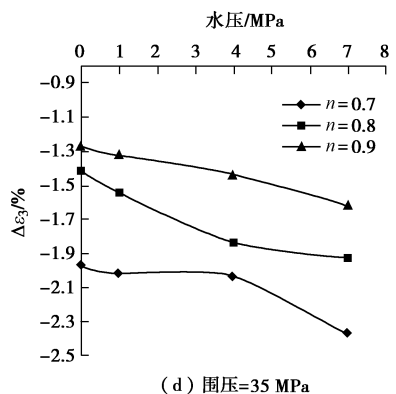
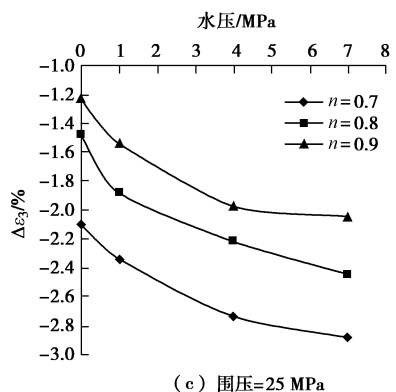
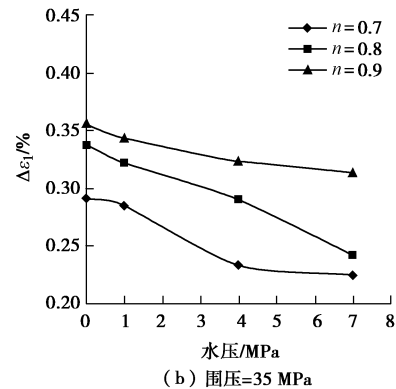
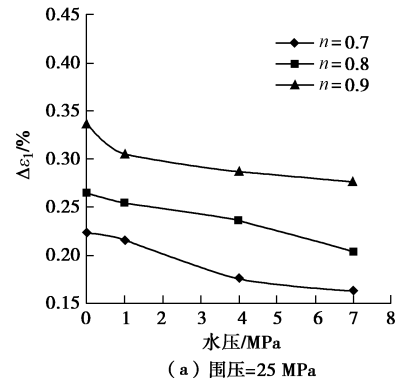


图5 卸荷第二阶段的 $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_3$ 与水压、初始卸荷水平的变化规律

Fig. 5 Variation of $\Delta\epsilon_1$ and $\Delta\epsilon_3$ with pore pressure and initial unloading level at second unloading stage

(2) 变形参数的损伤分析

卸荷过程中岩样除产生弹性变形外,还存在裂缝

变形^[13]。卸荷阶段的应变 ε 等于弹性应变 ε^e 和裂缝应变 ε^c 之和,即

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^e + \varepsilon_1^c, \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_3^e + \varepsilon_3^c, \quad (3)$$

式中, ε_1^c , ε_3^c 分别为轴向和侧向裂缝变形, ε_1^e , ε_3^e 分别为轴向和侧向弹性变形。

岩样在卸荷过程中, 损伤主要是由侧向应变引起的, 损伤变量可表示为

$$\omega = \partial \varepsilon_3^c / \partial \varepsilon_3 = 1 - \partial \varepsilon_3^e / \partial \varepsilon_3. \quad (4)$$

图 6 为按照式 (4) 计算得到的卸荷过程中峰值点的损伤变量 ω 随不同初始卸荷水平 n 和水压 p 的变化规律。

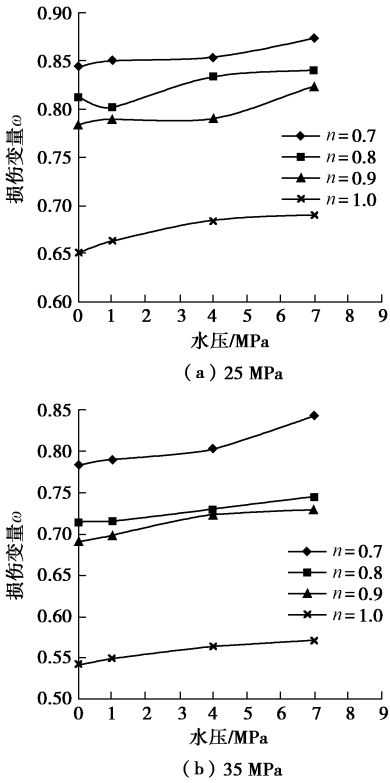


图 6 损伤变量 ω 随 n , p 的变化规律

Fig. 6 Change rules of damage variable ω with n and p

由图 6 可知: ①初始卸荷水平 n 一定时, 随着水压 p 的增大, 损伤变量 ω 呈增加趋势。当水压 p 一定时, 随着初始卸荷水平 n 的升高, 损伤变量 ω 呈减少趋势。且初始卸荷水平从 0.9~1.0 的过程中, 降低较明显, 初始卸荷水平从 0.7~0.9 的过程中损伤变量 ω 降低较为平缓, 说明不同初始卸荷水平的卸荷试验的损伤都比相应的三轴压缩试验大很多, 说明加卸载应力路径的不同造成岩样变形损伤过程差异明显, 这在文献[14]也有类似的叙述。

3 卸荷抗剪强度特征分析

岩石的抗剪强度根据主应力表示的莫尔-库仑准则^[13]有

$$\sigma_s = k\sigma_3 + b, \quad (5)$$

式中, σ_s 为围压为 σ_3 时的轴向峰值应力, σ_3 为侧向

应力, $k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$, $b = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$, 变换公式, 则有

$$\varphi = \arcsin \frac{k - 1}{k + 1}, \quad (6)$$

$$c = \frac{b(1 - \sin \varphi)}{2 \cos \varphi}. \quad (7)$$

分析不同初始卸荷水平 n 及水压 p 对抗剪强度的影响, 根据式 (5) 拟合出三轴卸荷试验的峰值、残余状态下的 c , φ 值, 见表 4。

表 4 不同初始卸荷水平及水压下三轴卸荷试验的强度参数回归表

Table 4 Regression data of strength parameters for triaxial tests under different initial unloading levels and pore pressures

试验方案	强度类型	水压 /MPa	k	b	R^2	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$
方案 1(70% 卸荷)	峰值	0	4.30	38.73	0.97	9.34	38.5
		1	4.06	29.89	0.99	7.17	37.04
		4	3.90	27.16	0.98	6.88	36.25
		7	3.56	23.26	0.99	6.17	34.12
	残余	0	2.90	3.82	0.97	1.12	29.15
		1	2.73	3.02	0.95	0.91	27.63
		4	2.64	2.01	0.94	0.62	26.81
		7	2.55	1.20	0.93	0.38	25.90
方案 2(80% 卸荷)	峰值	0	3.89	40.90	0.97	10.37	36.23
		1	3.87	36.22	0.99	9.20	35.62
		4	3.52	33.24	0.95	8.86	33.90
		7	3.43	27.01	0.97	7.29	33.28
	残余	0	2.75	7.56	0.99	2.28	27.84
		1	2.66	6.82	0.97	2.09	26.94
		4	2.53	3.58	0.95	1.12	25.72
		7	2.51	3.01	0.95	0.95	25.46
方案 3(90% 卸荷)	峰值	0	3.45	46.53	0.94	12.53	33.38
		1	3.42	41.66	0.99	11.27	33.18
		4	3.38	35.81	0.96	9.75	32.87
		7	3.19	30.30	0.95	8.48	31.54
	残余	0	2.61	10.95	0.99	3.39	26.48
		1	2.56	9.95	0.98	3.11	25.98
		4	2.50	7.01	0.98	2.22	25.42
		7	2.41	6.01	0.94	1.94	24.41
常规三轴压缩	峰值	0	2.46	56.94	0.97	18.14	24.99
		1	2.38	54.99	0.98	17.83	24.07
		4	2.32	51.11	0.98	16.78	23.43
		7	2.27	46.09	0.99	15.31	22.80
	残余	0	2.22	16.79	1.00	5.63	22.29
		1	2.16	13.78	1.00	4.69	21.47
		4	2.08	10.02	0.98	3.47	20.54
		7	1.91	8.01	0.86	2.90	18.20

根据表4, 综合水压与初始卸荷水平的影响, 将常规三轴压缩试验看为初始卸荷水平为1的试验^[10], 对卸荷状态的黏聚力进行二元函数拟合, 可以发现黏聚力与初始卸荷水平、水压符合以下关系式:

$$c_u = ae^{b \cdot n} + e \cdot p + f \quad (8)$$

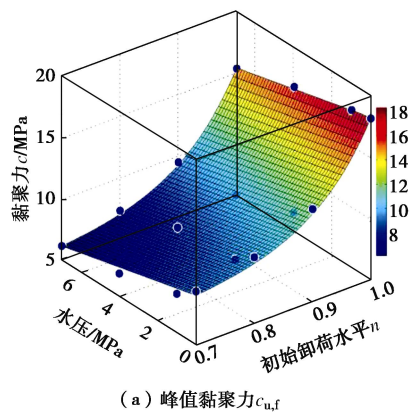
式中, c_u 为卸荷状态下的黏聚力, n 为初始卸荷水平 ($n \leq 1$), p 为水压, a, b, e, f 为回归参数。根据该公式对峰值及残余下的黏聚力进行拟合, 拟合曲面如图7, 因此可以根据此二元函数中初始卸荷水平 n 及水压 p 的值, 预测各初始卸荷水平及水压条件下的摩擦角, 有一定工程意义, 相关拟合表达式有:

峰值黏聚力

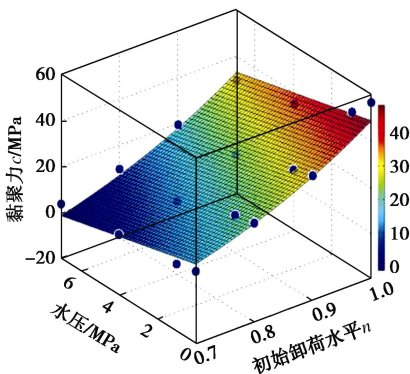
$$c_{u,f} = 0.004784e^{9.915n} - 0.4067p + 8.531 \quad (R^2=0.98); \quad (9)$$

残余黏聚力

$$c_{u,r} = 2.877e^{2.993n} - 2.232p - 8.99 \quad (R^2=0.95)。 \quad (10)$$



(a) 峰值黏聚力 $c_{u,f}$



(b) 残余黏聚力 $c_{u,r}$

图7 卸荷黏聚力与水压 p 和初始卸荷水平 n 的关系

Fig. 7 Relationship among unloading ultimate cohesion, water pressure and initial unloading level

同理, 对卸荷状态的摩擦角进行二元函数拟合, 可以发现黏聚力与初始卸荷水平、水压符合以下关系式:

$$\varphi_u = an^2 + bn + e \cdot p + f \quad (11)$$

式中, φ_u 为卸荷状态下的摩擦角, n 为初始卸荷水平

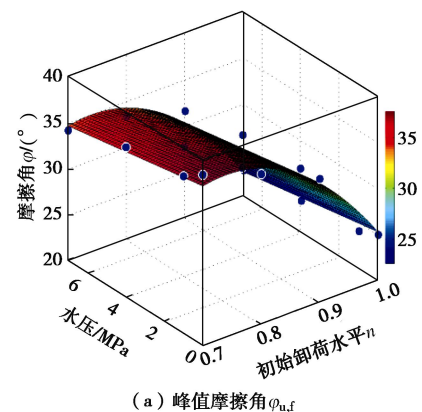
($n \leq 1$), p 为水压, a, b, e, f 为回归参数。根据该公式对峰值及残余下的摩擦角进行拟合, 拟合曲面如图8, 同样可以根据此二元函数中初始卸荷水平 n 及水压 p 的值, 预测各初始卸荷水平及水压条件下的黏聚力, 有一定工程意义, 相关拟合表达式有:

峰值摩擦角

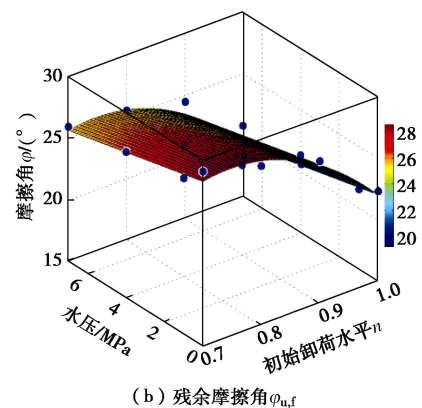
$$\varphi_{u,f} = -180n^2 + 266n - 0.3809p - 60.72 \quad (R^2=0.97); \quad (12)$$

残余摩擦角

$$\varphi_{u,r} = -101.6n^2 + 151.6n - 0.391p - 27.98 \quad (R^2=0.95)。 \quad (13)$$



(a) 峰值摩擦角 $\varphi_{u,f}$



(b) 残余摩擦角 $\varphi_{u,r}$

图8 卸荷摩擦角与水压 p 和初始卸荷水平 n 的关系

Fig. 8 Relationship among unloading ultimate friction angle, pore pressure and initial unloading level

在以往的研究中, 对渗透水压环境中的岩石抗剪强度参数的室内测试, 只能采用考虑天然状态与饱水状态下的抗剪强度参数结果^[15], 利用有效应力原理去计算得到处于渗透水压条件下岩石的力学特性, 其结果存在一定的误差。对存在渗透水压, 特别是高渗透水压下的试验, 文献[2, 5, 6, 15]等都直接采用抗剪参数试验结果, 其值比理论计算值更为准确真实, 因此本文也同样直接采用试验结果。

此外, 以往对三轴加载岩样的强度参数分析中, 认为对于符合 Mohr-Coulomb 强度准则的材料, 其黏聚力 c 和摩擦角 φ 为常数。根据上述分析, 发现对于

不同初始卸荷水平 n 和水压 p 条件下的卸荷试验来说是不合适的。考虑 n 和 p 的影响, 根据式(8)~(13), 针对本文所研究的砂岩, 其 Mohr-Coulomb 准则的修正表达式:

峰值抗剪强度,

$$\tau_{u,f} = \sigma \tan(-180n^2 + 266n - 0.3809p - 60.72) + 0.004784e^{9.915n} - 0.4067p + 8.531, \quad (14)$$

残余抗剪强度,

$$\tau_{u,r} = \sigma \tan(-101.6n^2 + 151.6n - 0.39p - 27.98) + 2.87e^{2.993n} - 2.232p - 8.99, \quad (15)$$

式中, $\tau_{u,f}$ 为卸荷条件下的峰值抗剪强度, $\tau_{u,r}$ 为卸荷条件下的残余抗剪强度。

4 结 论

(1) 初始卸荷水平 n 一定时, 随着水压的增加, 卸荷极限强度的降低呈现先快后慢的规律。当水压 p 一定时, 随着 n 的降低, 卸荷极限强度线性减小。

(2) 水压 p 一定时, 统一围压降参数 η 随着初始卸荷水平 n 的提高线性降低, n 越高, 岩样达到破坏所经历的卸围压过程越短, 围压卸荷量越小。当 n 一定时, 随着 p 的增大, 岩样更容易发生破坏, 岩样的脆性特征更明显。

(3) 初始卸荷水平 n 一定时, 随着水压 p 的增大, 损伤变量 ω 呈增加趋势。当水压 p 一定时, 随着 n 的升高, 损伤变量 ω 减少。且 n 从 0.9~1 的过程中, ω 降低较明显, 说明不同的加卸荷路径会较大影响损伤变量。

(4) 综合初始卸荷水平 n 和水压 p 的影响, 对摩擦角和黏聚力进行了二元函数拟合, 利用该拟合公式可以预测不同 n , p 条件下的黏聚力和摩擦角的值, 有一定工程意义。并基于对试验数据的拟合, 对不同 n , p 作用下的砂岩 Mohr-Coulomb 准则表达式进行了修正。

参考文献:

- [1] 唐 浩, 李天斌, 陈国庆, 等. 水力作用下砂岩三轴卸荷试验及破裂特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 519 - 525. (TANG Hao, LI Tian-bin, CHEN Guo-qing, et al. Triaxial unloading tests on rupture characteristics of sandstone under hydro-mechanical coupling conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 519 - 525. (in Chinese))
- [2] 陈秀铜, 李 璐. 高围压、高水压条件下岩石卸荷力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2694 - 2699. (CHEN Xiu-tong, LI Lu. Experimental study of unloading mechanical properties of rock under high confining pressure and high water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2694 - 2699. (in Chinese))
- [3] 梁宁慧, 刘新荣, 艾万民, 等. 裂隙岩体卸荷渗透规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2011(1): 88 - 92. (LIANG Ning-hui, LIU Xing-rong, AI Wan-min, et al. Experiment study on the permeability of fractured rock under unloading[J]. China Civil Engineering, 2011(1): 88 - 92. (in Chinese))
- [4] LIU X R, LIU J, LIANG N H, et al. Experimental and theoretical analysis of permeability characteristics of sandstone under loading and unloading[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2016, 9(5): 36 - 43.
- [5] 邢福东, 朱珍德, 刘汉龙, 等. 高围压高水压作用下脆性岩石强度变形特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 184 - 187. (XING Fu-dong, ZHU Zhen-de, LIU Han-long, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of brittle rocks under high confining pressure and hydraulic pressure[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(2): 184 - 187. (in Chinese))
- [6] 李志敬, 朱珍德, 施 毅, 等. 高围压高水压条件下岩石卸荷强度特性试验研究[J]. 河海大学学报自然科学版, 2009, 37(2): 162 - 165. (LI Zhi-jing, ZHU Zhen-de, SHI Yi, et al. Unloading strength properties of rocks under high confining pressure and hydraulic pressure[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2009, 37(2): 162 - 165. (in Chinese))
- [7] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1807 - 1817. (QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1807 - 1817. (in Chinese))
- [8] 黄润秋, 黄 达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 21 - 33. (HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of jinping marble under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 21 - 33. (in Chinese))
- [9] 王在泉, 张黎明, 孙 辉. 不同卸荷速度条件下灰岩力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1045 - 1050.

- (WANG Zai-quan, ZHANG Li-ming, SUN Hui. Experimental study of mechanical properties of limestone under different unloading velocities[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1045 - 1050. (in Chinese))
- [10] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同初始损伤和卸荷路径下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1686 - 1697. (QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental prsearch on mechanical properties of deep marble under different initial damage levels and undloading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1686 - 1697. (in Chinese))
- [11] 周科平, 苏淑华, 胡振襄, 等. 不同初始损伤下大理岩卸荷的核磁共振试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2144 - 2150. (ZHOU Ke-ping, SU Shu-hua, HU Zhen-rang, et al. Experimental research into nuclear magnetic resonance in marble with different initial damages under unloading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8): 2144 - 2150. (in Chinese))
- [12] 陈学章, 何江达, 肖明砾, 等. 三轴卸荷条件下大理岩扩容与能量特征分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1106 - 1112. (CHEN Xu-zhang, HE Jiang-da, XIAO Ming-le, et al. Dilatancy and energy properties of marble under triaxial unloading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1106 - 1112. (in Chinese))
- [13] 朱杰兵. 高应力下岩石卸荷及其流变特性研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009. (ZHU Jie-bing. Stundy on unloading mechanics and its reological properties of rock under high stress[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese))
- [14] 俞 缙, 李 宏, 陈 旭, 等. 砂岩卸围压变形过程中渗透特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 of 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))
- [15] 徐德敏. 高渗压下岩石(体)渗透及力学特性试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008. (XU De-min. Permeability and mechanics characteristics test studying on rock or rock mass under high seepage pressure[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese))

第十届全国基坑工程研讨会暨第一届全国可回收锚索技术研讨会 (第2号通知)

由中国建筑学会建筑施工分会主办, 兰州理工大学承办的“第十届全国基坑工程研讨会暨第一届全国可回收锚索技术研讨会”将于2018年9月14日~16日在甘肃省兰州市召开。为进一步加强论文征集, 现发出会议第2号征文通知。

主办单位: 中国建筑学会建筑施工分会。

承办单位: 兰州理工大学。

会议主题: ①基坑工程设计理论与实践及其新进展、行业的发展趋势; ②基坑工程施工和监测领域的新技术、新工法和新设备; ③基坑工程及特殊岩土层中的地下水问题及控制技术; ④基坑施工对周围环境的影响评估与控制技术; ⑤地铁深基坑工程中的设计、施工与监测技术; ⑥黄土、软弱土等特殊土地地区基坑设计与施工的关键技术; ⑦可回收锚杆(索)设计、施工与监测技术; ⑧深基坑工程支护结构与降水相关问题数值模拟研究; ⑨超深基坑工程的设计、施工与监测的关键技术; ⑩基坑工程领域的信息化技术及其应用; ⑪重、大、特基坑工程的典型案例和基坑工程事故分析。

论文投稿要求: ①论文要求尚未公开发表, 论点明确, 论据可靠, 数据准确, 文字精炼, 引用文献明确出处, 篇幅控制在A4纸6页以内。②论文内容务必实事求是, 不得侵犯他人著

作权, 不涉及保密内容, 文责自负。③会议论文格式一律按照《岩土工程学报》期刊格式撰写。④务必注明作者详细通讯地址、邮编、联系电话及E-mail地址。

论文评审与出版: 对经学术委员会推荐、相关期刊编委会评审通过的论文将分别以《岩土工程学报》和《岩土力学》正刊或增刊等形式出版; 经学术委员会评审通过的所有论文将以论文集的形式出版。

重要日期安排: ①论文提交截止日期由2018年4月30日改为2018年5月31日。此前提供论文电子版一份, 发送至邮箱 jikenghy2018@163.com。②论文录用通知日期: 论文将组织学术委员会专家评审, 录用通知及修改意见将在2018年5月31日前通知作者。③论文修改返回日期: 作者根据修改意见和排版要求定稿, 于2018年6月20日前将修改稿和修改说明电子版发到会议组委会。

会议秘书处联系方式: 甘肃省兰州市七里河区兰工坪路287号, 兰州理工大学土木工程学院, 邮编730050。联系电话: 周勇13119308411, 叶帅华13893624445, 韦正德13639330876, 杨校辉15095338032。电子邮箱: jikenghy2018@163.com。

(大会组委会 供稿)