

# 三轴压缩下茅口灰岩围压效应的试验研究

王亚, 王文, 赵延林, 罗世林, 唐劲舟

(湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 针对南方广泛存在的茅口灰岩, 利用 MTS815 电液伺服控制刚性试验机进行不同围压下三轴压缩试验, 通过拟合分析, 结果表明: (1) 三轴抗压强度随着围压的增大, 且呈线性增长; 低围压条件下, 茅口灰岩弹性模量随围压增大而增大, 围压超过 17 MPa, 弹性模量趋于稳定; 泊松比随围压增加成二次非线性增长趋势。 (2) 低围压条件下, 岩样扩容率较小时即发生脆性破坏, 体积应变扩容率随着围压的增大而提高; 围压为 12 MPa, 岩样由脆性向延性转化, 围压加至 17 MPa, 岩样表现为延性流动。 (3) 随着围压的逐渐增加, 岩样破坏方式趋于简单, 由侧向剪切破坏逐渐转为对角剪切破坏, 破坏角增大。

**关键词:** 茅口灰岩; 围压; 三轴压缩; 延性

**中图分类号:** TU459

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-9102(2015)03-0050-06

## Experimental study of confining pressure effect under triaxial compressive strength of Maokou limestone

WANG Ya, WAN Wen, ZHAO Yanlin, LUO Shilin, TANG Jingzhou

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

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Under different confining pressure, triaxial compressive strength of Maokou limestone is tested by MTS 815 test system. Results show that (1) with the increase of confining pressure, triaxial compressive strength increase and present linear relation. Under low confining pressure, the elastic modulus increase with the confining pressure increases, and elastic modulus tends to be stable when confining pressure is higher than 17 MPa. Relationship between the Poisson ratio and confining pressure is nonlinear quadratic polynomial relations; (2) Under low confining pressure, the fracture of rock samples is brittle fracture when expansion rate is low, and expansion rate increases with the confining pressure increasing. Confining pressure is 12 MPa, rock samples is from brittle transiting to ductile, confining pressure is 17 MPa, rock samples turn to ductile, and (3) Fracture angles increase with the increase of confining pressure. Rupture type of rock samples changes from lateral shear fracture to diagonal shear fracture.

**Key words:** Maokou limestone; confining pressure; triaxial compressive strength; ductile

矿山岩体一般赋存于地下, 处于三向应力状态下, 因此, 研究岩石在三轴压缩条件下的力学特性对实际工程更具有实际意义。国内外学者<sup>[1-6]</sup>对此也做了大量研究工作并取得丰厚的研究成果, 苏承东等针对红砂岩<sup>[7]</sup>研究了其三轴强度与变形特性; 刘刚等针对煤岩<sup>[8]</sup>探讨了其三轴压缩下的变形特性; 梁冰针对油页岩<sup>[9]</sup>探讨了其三轴压缩下水作用的影响; 砂质泥岩<sup>[10]</sup>、碎屑砂岩<sup>[11]</sup>、多晶冰<sup>[12]</sup>等亦被广泛用于三轴压缩试验。针对不同温度条件下, 单仁亮等针对红砂岩<sup>[13]</sup>研究了负温饱水状态下三轴压缩强度特性; 王丰等针对千枚岩<sup>[14]</sup>研究了常规三轴压缩的各向异性; 徐小丽等针对花岗岩<sup>[15]</sup>探讨了高温作用下的三轴压缩力学特性。

茅口灰岩为深灰或浅灰色的白云质斑块灰岩, 属于二叠纪中期的地层, 是南方煤矿开采中广泛遇到的

收稿日期: 2015-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174088); 湖南科技大学研究生创新基金资助项目(S140002)

通信作者: 王文(1968-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 教授, 研究方向: 岩石力学。E-mail: wanwen68@163.com

工程介质.对于三轴压缩条件下茅口灰岩强度特性缺乏完整系统的试验研究,为了深入研究岩石三轴压缩下破坏过程,本文选取茅口灰岩为试验岩样,做不同围压下三轴压缩试验,研究其围压效应.

## 1 力学试验

### 1.1 试样制取

岩样取自长沙某煤矿,该矿煤层基底为茅口灰岩,选取均质性与完整度较好的岩块,采用钻孔取样机钻取岩芯,再用切割机切割,最后用磨石机打磨,使端面光滑平整,使之符合《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266-99)的加工要求,制得的试样为50 mm × 100 mm 圆柱形试件,如图1所示.

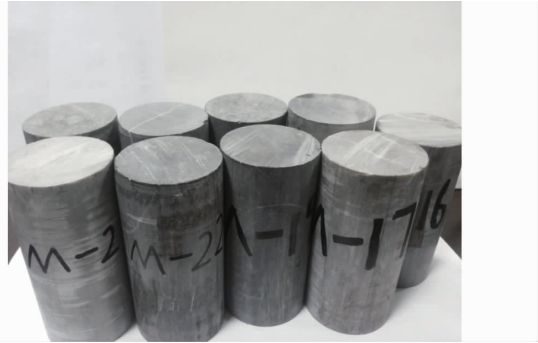


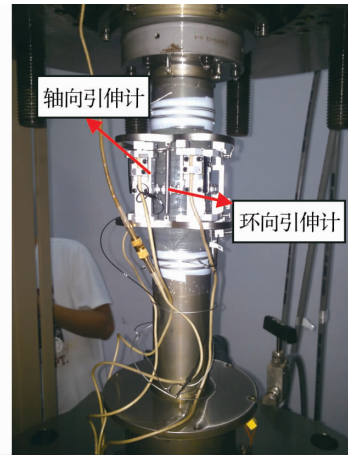
图1 岩样

### 1.2 试验装置

实验仪器为美国 MTS 公司生产的多功能电液伺服控制刚性试验机(MTS815),该实验系统是目前国内配置最高、性能最先进的岩石力学实验装备,拥有轴压,围压,孔隙水压和温度4套独立控制系统与一套数据采集系统,整体刚度  $10.5 \times 10^9$  N/m,最大轴力 4 600 kN,最大围压 140 MPa.进行三轴压缩试验,图2为 MTS 试验机试验系统装置,通过图2b中的轴向位移引伸计与环向位移引伸计采集试样的轴向位移和环向位移,可实现实验全过程数据的动态监测.



(a) MTS 试验机



(b) 试验装置示意图

图2 MTS 试验机试验系统装置

### 1.3 三轴压缩试验

将岩样置入三轴腔内,试件外部包裹一层透明热塑管,用热风机加热热塑管使之紧密贴合岩样,防止岩样破裂时碎渣溅入硅油内.将环向引伸计安装在试件中部,实时监测其环向位移,将轴向引伸计设置在环向引伸计上下端,用于监测轴向位移.图2b为试验装置示意图.

为研究围压对茅口灰岩三轴压缩下强度变化的规律,将岩样分为5组,每组1个岩样,围压分别设置为0,7,12,17,22 MPa 5个等级.试验时,预加载2 kN 轴力,用于检测环向引伸计、轴向引伸计是否正常.然后再加载围压,当围压达到预设应力值后,采用力控方式,保持围压不变.之后以0.5 kN/s的速度加载轴力,直至试样破坏.为了精确记录试样变化情况,数据采集系统以5次/s的采集频率采集数据,记录下试样破坏时的最大轴力.对采集系统中环向位移、轴向位移和最大轴力等数据进行分析、计算,绘得不同围压下三轴破坏环向-轴向应力应变曲线如图3所示.

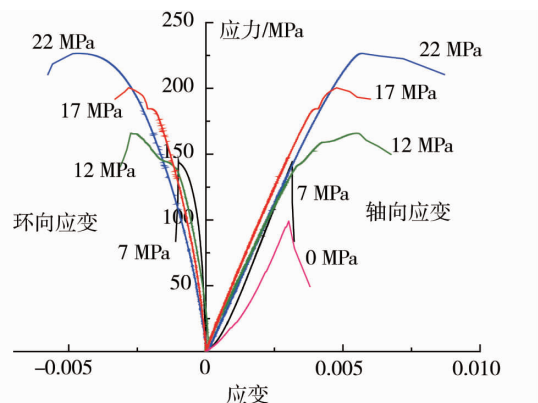


图3 环向-轴向应力应变

## 2 试验结果分析

### 2.1 围压对三轴抗压强度的影响

通过数据采集系统获得不同围压下岩石三轴抗压强度如表 1 所示. 岩石加载至破裂经历以下阶段: 微裂隙压密阶段、弹性变形阶段、裂隙发生与扩展阶段、裂纹不稳定扩展至破裂阶段. 围压对岩石强度的影响是显著的, 为进一步反映三轴压缩下茅口灰岩的围压效应, 采用 origin 软件对表 1 所得数据进行线性拟合, 采用单一变量法只改变围压, 得出三轴抗压强度  $\sigma_{3c}$  与围压强度  $\sigma_3$  的拟合结果为

$$\sigma_{3c} = 100.613 + 5.752\sigma_3. \quad (1)$$

得出三轴抗压强度  $\sigma_{3c}$  与围压强度  $\sigma_3$  数据点及其拟合曲线如图 4 所示.

拟合的相关性系数为 0.995, 拟合度极高, 能较好的反映三轴抗压强度与围压呈线性增长关系, 当围压  $\sigma_3 = 0$  MPa 时, 最大主应力为 99.3 MPa, 围压  $\sigma_3 = 7, 12, 17, 22$  MPa 时, 三轴抗压强度分别提升 45.7%, 77%, 101.4%, 128.1%, 可见随着围压增加岩石的强度显著增强.

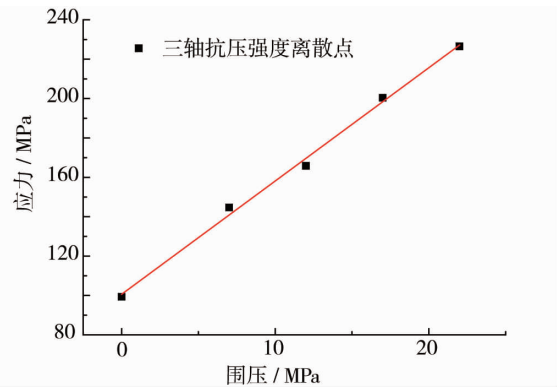


图 4 三轴抗压强度拟合曲线

### 2.2 围压对形变参数的影响

通过数据采集系统得到峰值 50% 处, 峰值所对应的环向、轴向位移, 由于 0 MPa 下环向引伸计插销未拔导致环向应变数据失真, 固舍去, 将其余所得数据制得表 1.

表 1 不同围压下强度及形变参数

围压/MPa	$\sigma_{3c}/\text{MPa}$	环向形变		轴向形变	
		50% $\sigma_r/\text{mm}$	$\sigma_r/\text{mm}$	50% $\sigma_r'/\text{mm}$	$\sigma_r'/\text{mm}$
0	99.3	/	/	0.194	0.303
7	144.7	0.008	0.050	0.180	0.315
12	165.8	0.020	0.136	0.184	0.520
17	200.4	0.035	0.141	0.198	0.477
22	226.5	0.054	0.235	0.251	0.573

峰值轴向形变在围压为 7, 12, 17, 22 MPa 下较单轴压缩情况下分别提高了 4.0%, 71.6%, 57.4%, 89.1%, 17 MPa 下轴向形变较 12 MPa 下有所降低, 总体随围压增大而增大. 峰值环向形变在围压为 12, 17, 22 MPa 时比 7 MPa 下分别提高 172%, 182% 和 370%, 环向应变随围压增加而急剧增加. 为进一步反映围压对形变的影响, 选取割线弹性模量  $E_s$ , 泊松比  $\mu_s$ , 切线弹性模量  $E_t$  与泊松比  $\mu_t$  4 个参数, 计算公式为

$$E_s = \frac{\sigma_{50}}{\varepsilon_{x50}}; \quad (2)$$

$$\mu_s = \frac{\varepsilon_{y50}}{\varepsilon_{x50}}; \quad (3)$$

$$E_t = \frac{\sigma_{t2} - \sigma_{t1}}{\varepsilon_{x2} - \varepsilon_{x1}}; \quad (4)$$

$$\mu_t = \frac{\varepsilon_{y2} - \varepsilon_{y1}}{\varepsilon_{x2} - \varepsilon_{x1}}. \quad (5)$$

式中,  $\sigma_{50}, \varepsilon_{x50}, \varepsilon_{y50}$ : 峰值强度 50% 处的应力, 轴向应变与环向应变;  $\sigma_{t2}, \sigma_{t1}$ : 对应应力应变曲线上直线段终点, 始点应力值;  $\varepsilon_{y2}, \varepsilon_{y1}$ : 该直线段终点, 始点应力值对应的环向应变值;  $\varepsilon_{x2}, \varepsilon_{x1}$ : 该直线段终点, 始点应力

值对应的轴向应变值. 得表2.

表2 不同围压下岩石强度及变形参数

围压 $\sigma_3$ /MPa	割线弹性模量 $E_s$ /GPa	泊松比 $\mu_s$	切线弹性模量 $E_t$ /GPa	泊松比 $\mu_t$
0	0.25	/	0.32	/
7	0.40	0.089	0.51	0.121
12	0.45	0.215	0.64	0.246
17	0.51	0.347	0.68	0.352
22	0.45	0.429	0.69	0.433

算得的切线弹性模量值普遍大于割线弹性模量,这是茅口灰岩孔隙度较大且延性较强所致,并且切线泊松比略大于割线泊松比. 通过拟合割线弹性模量  $E_s$ ,泊松比  $\mu_s$  与围压强度  $\sigma_3$  的关系依次为

$$E_s = 0.246 + 0.028\sigma_3 - 0.00085\sigma_3^2; \tag{6}$$

$$\mu = -0.143 + 0.036\sigma_3 - 0.00044\sigma_3^2. \tag{7}$$

拟合曲线如图5所示.

拟合度分别为0.94与0.99,围压为7,12,17 MPa时弹性模量比0 MPa下分别增大60%,80%,104%,低围压条件下,弹性模量随围压增大而增大,这是因为茅口灰岩内部存在孔隙,当孔隙被压密后,孔隙表面积接触面加大,当围压增大时,摩擦力相应提高,宏观上表现为弹性模量增大. 围压为22 MPa时比17 MPa弹性模量小幅下降,当围压超过17 MPa时,弹性模量趋于稳定,当围压增加到一定程度时,孔隙内接触面积不再加大,即使围压继续加大,弹性模量也不再增加. 泊松比随围压增加成二次非线性增长趋势,环向应变随围压增加而增加,进一步,由图3看出,环向应变曲线上升段斜率逐渐减小,环向应变明显增大,这是岩石塑性不断增大,脆性减弱,延性加强的表现,随围压增加,岩石塑性不断增强,固环向应变也相应增大.

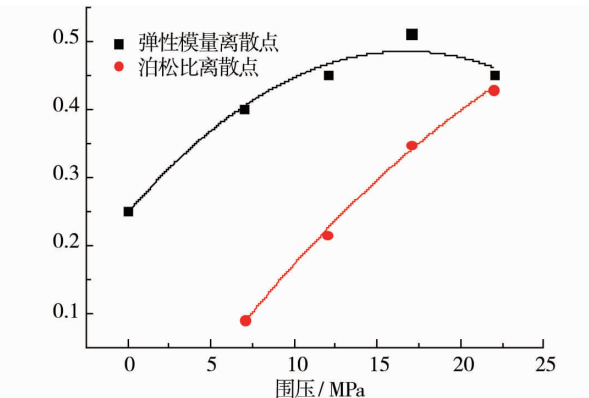


图5 弹性模量、泊松比拟合曲线

为进一步反映茅口灰岩随围压变化的形变规律,根据式(8)计算出试样的体积应变:

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3. \tag{8}$$

式中, $\Delta V$ :试样体积变化量; $V_0$ :试样原体积; $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ :轴向应变,环向应变(取负值).

计算所得的体积应变图如图6所示,在7 MPa围压条件下,曲线变形与试样典型体积应变规律一致,随着轴力增加,试样先后经过微裂隙压密阶段和弹性变形阶段,此时的体积压缩量达到最大值,随后试样内部微裂隙开始萌生扩展,体积形变量减小,环向变形开始逐渐增大,当裂隙沿着轴力加载方向持续扩展时,相邻裂隙面产生滑移,环向应变持续增大,当体积应变恢复并超过原岩样体积时,岩样破裂,产生扩容现象,表现为脆性破坏. 当围压增至12 MPa时,体积压缩量大幅减小,岩样扩容现象明显,岩样由脆性破坏向延性流动过渡. 当围压为17 MPa时,岩样体积直接产生扩容现象,岩样表现为延性流动. 当围压进一步增大到22 MPa时,岩样的体积扩容率也随之增大. 说明随着围压的增大,茅口灰岩体积应变扩容率随之提高,当

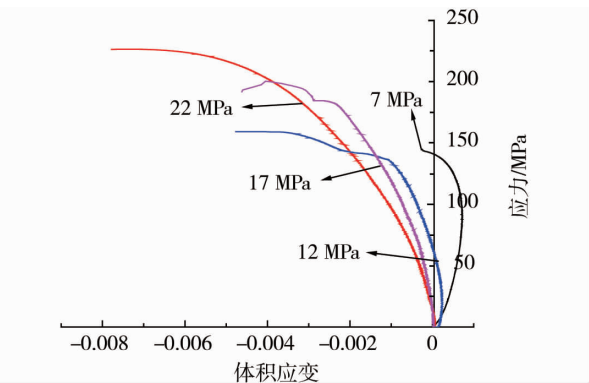


图6 各国压下体积应变

围压为 12 MPa 时,岩样由脆性向延性转化的过渡状态,当围压加至 17 MPa 时,岩样表现为延性流动。

### 2.3 不同岩石的形变参数

为了横向比较茅口灰岩与同类岩石的变形规律,选取国内学者研究较多的砂岩<sup>[11]</sup>与花岗岩<sup>[13]</sup>,通过对比数据,如表 3 所示。

表 3 不同岩石强度及变形参数

	围压/MPa	强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
茅口灰岩	0	99.3	0.250	/
	7	144.7	0.400	0.089
	12	165.8	0.450	0.215
	17	200.4	0.510	0.347
	22	226.5	0.450	0.429
砂岩 <sup>[11]</sup>	0	39.5	1.620	0.183
	4	47.2	1.810	0.188
	8	53.7	1.930	0.189
	12	62.1	2.010	0.192
花岗岩 <sup>[13]</sup>	0	120.4	14.187	/
	10	209.2	13.758	/
	20	304.6	12.235	/
	30	372.0	18.475	/

由表 3 看出,与其它 2 类岩石相比,在同级围压条件下,茅口灰岩强度适中,茅口灰岩强度远大于砂岩略小于花岗岩。茅口灰岩弹性模量随围压增大而增大,与砂岩类似,但是弹性模量量级远小于其它 2 种岩石,茅口灰岩岩性与这 2 种岩石差异性较大,说明茅口灰岩较为孔隙率较大,内部微裂隙较多,茅口灰岩延性较好。砂岩泊松比随围压增加略微上涨,茅口灰岩泊松比随围压增加显著增加,茅口灰岩岩性受围压影响更为显著,随着围压增加茅口灰岩由脆性过渡为延性现象较为明显。

### 2.4 破坏特征

随着围压的逐渐增加,试样破坏方式趋于简单,7,17,22 MPa 下均为剪切破坏,出现单一剪切面,剪切

破坏面处翼型张拉裂纹较少,破坏面较为规整;12 MPa 为不规则剪切破坏,出现多个剪切面。随围压增加,试件由侧向剪切破坏逐渐转为对角剪切破坏,裂纹破裂面逐渐贯通整个试件,破坏角依次为 47°,53°,67°,72°,破坏角逐渐增大,且试件两端被压密,出现扩容现象,端面两侧的微小裂隙出现了部分张拉破坏,茅口灰岩试样破坏形式如图 7 所示。

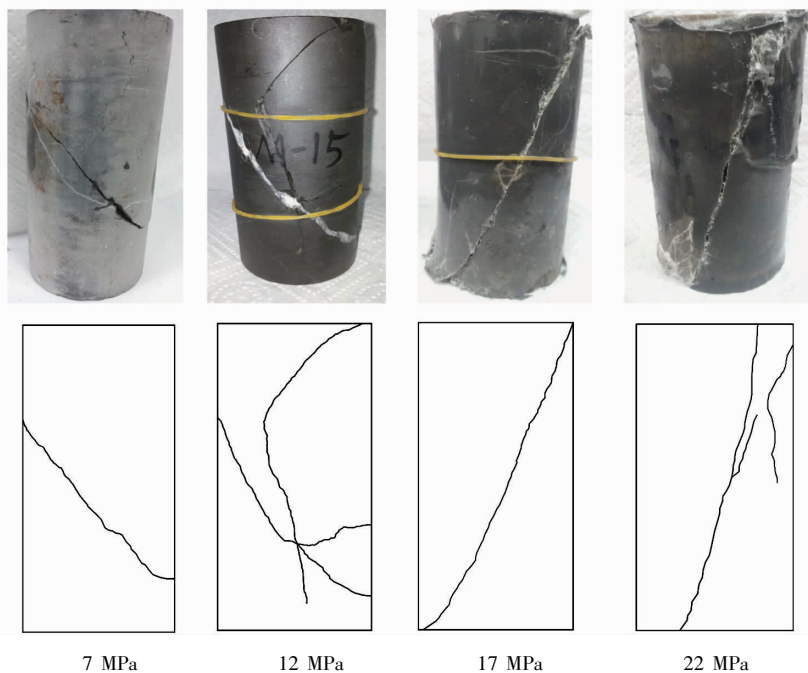


图 7 茅口灰岩试样破坏形式

### 3 结论

1)随着围压的增大三轴抗压强度呈线性增长;茅口灰岩弹性模量随围压增大而增大,在 17 MPa 处趋于稳定;泊松比随围压增加成二次非线性增长趋势。

2)低围压条件下,岩样扩容率较小时即发生脆性破坏.随着围压的增大,体积应变扩容率随之提高,当围压为 12 MPa 时,岩样表现为由脆性向延性转化的过渡状态,当围压加至 17 MPa 时,岩样表现为延性流动.茅口灰岩较其它岩石孔隙率大,延性较好。

3)随着围压的逐渐增加,试样破坏方式趋于简单,试件由侧向剪切破坏逐渐转为对角剪切破坏,破坏角增大。

#### 参考文献:

- [1] Carter B J, Duncan S E J, Lajtai E Z. Fitting strength criteria to intact rock[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1991,9(1):73-81.
- [2] Alsha Y N A, Khan K, Abduljawwad S N. Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode(I-II) fracture toughness of a lime-stone rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000,37(4):629-643.
- [3] You M Q. True triaxial strength criteria for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009,46(1):115-127.
- [4] 肖桃李,李新平,郭运华.三轴压缩条件下单裂隙岩石的破坏特性研究[J].岩土力学,2012,33(11):54-59.
- [5] 田勇,俞然刚.不同围压下灰岩三轴压缩过程能量分析[J].岩土力学,2014,35(1):118-129.
- [6] 尤明庆.岩石的力学性质[M].北京:地质出版社,2007.
- [7] 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):5-6.
- [8] 刘刚,李明.煤岩单轴与三轴压缩试验研究[J].煤矿安全,2013,44(7):4-6.
- [9] 梁冰,兰波,王俊光.水影响下油页岩三轴压缩力学特性试验研究[J].山东大学学报(工学版),2011,41(5):82-85.
- [10] 于怀昌,周敏,刘汉东,等.粉砂质泥岩三轴压缩应力松弛特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):803-811.
- [11] 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.
- [12] 徐洪宇,赖远明,喻文兵,等.人造多晶冰三轴压缩强度特性试验研究[J].冰川冻土,2011,33(5):1120-1126.
- [13] 单仁亮,杨昊,郭志明,等.负温饱水红砂岩三轴压缩强度特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(s2):3657-3664.
- [14] 王丰,孟陆波,李天斌.千枚岩常规三轴压缩各向异性特征试验研究[J].公路,2014(10):216-222.
- [15] 徐小丽,高峰,张志镇.高温作用后花岗岩三轴压缩试验研究[J].岩土力学,2014,35(11):3177-3183.