



移动扫码阅读

秦楠,张作良,冯学志,等.蠕变作用后裂隙类岩石单轴强度和裂纹扩展规律研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):244-249. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.031  
QIN Nan, ZHANG Zuoliang, FENG Xuezhi, et al. Study on uniaxial strength and crack propagation law of cracked similar rock after creep [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 ( 12 ): 244 - 249. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.12.031

# 蠕变作用后裂隙类岩石单轴强度和裂纹扩展规律研究

秦楠,张作良,冯学志,刘亚琦,崔立桩,王永岩  
(青岛科技大学机电工程学院,山东青岛 266061)

**摘要:**岩体在工程中受到外部载荷的长期作用,时间效应突出,且本身含有的不规则裂隙和孔隙,使得岩体强度和流变性更为复杂。为了研究裂隙类岩石蠕变作用对试件强度、破坏形式和裂纹扩展规律的影响,笔者预制单裂隙类岩石试件,第 1 组保证在同一应力水平和时间下,先进行单轴蠕变试验,再进行单轴压缩试验,第 2 组直接进行单轴压缩试验。研究发现:对单裂隙类岩石作用低应力蠕变,裂隙角度减小,蠕变效应对单轴压缩强度的影响变小。裂隙角度由 90° 变至 75° 过程中,蠕变效应强化作用减弱;45° 时,蠕变效应起劣化作用;30° 变至 0°,劣化效应不明显。蠕变预处理试件与直接单轴压缩试件相比缺少明显的压密阶段,裂隙角度较小时,峰值应力区域变大。蠕变作用后试件弹性模量比直接压缩试件大,但随裂隙角度增大,弹性模量变小。蠕变作用对单轴压缩裂纹破坏机制和扩展规律的影响与裂隙角度有关,角度小时区别明显。先蠕变后压缩次生裂纹从原生裂纹尖端周围发起,裂纹短密集,而直接压缩次生裂纹稀疏向两端延伸扩展。

**关键词:**裂隙类岩石;蠕变作用;单轴抗压强度;失效形式;次生裂纹

**中图分类号:**TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)12-0244-06

## Study on uniaxial strength and crack propagation law of cracked similar rock after creep

QIN Nan, ZHANG Zuoliang, FENG Xuezhi, LIU Yaqi, CUI Lizhuang, WANG Yongyan  
(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266601, China)

**Abstract:** The rock mass is subjected to the long-term action of external load in the engineering, the time effect is prominent, and it contains irregular cracks and pores, which make the strength and rheological property of the rock mass more complex. In order to study the effect of creep behavior of cracked similar rock on rock strength, failure mode and crack propagation law, the specimens of prefabricated crack similar rock were pretreated and divided into two groups. One group first was carried out uniaxial creep test to ensure the same stress and time, and the uniaxial compression test was then carried out. The second group was directly subjected to the uniaxial compression test. The experimental results show that: low stress creep acts on a single cracked similar rock. The effect of creep on uniaxial compression strength decreases with the decrease of fracture angle. During the process of fracture angle from 90° to 75°, the strengthening effect of creep is weakened. At 45°, creep effect deteriorates. The degradation effect is not significant when it varies from 30° to 0°. Comparing with direct uniaxial compression test, the uniaxial compression test after creep lacks obvious compaction stage, but there are bigger areas of peak stress at small fracture angle. The modulus of uniaxial compression after creep is obviously larger than the direct uniaxial compression, but the elastic modulus decreases as the crack angle increases. The effect of creep behavior on crack failure mechanism and crack propagation law under uniaxial compression is related to crack angle, when the angle is small, the difference is obvious. The secondary cracks begin around the tip of the primary crack after creep and then compression. The cracks are short and dense, while the secondary cracks under di-

收稿日期:2020-08-22;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674149);山东省自然科学基金资助项目(ZR2018PEE005);煤矿安全高效开采采部共建教育部重点实验室开放基金资助项目(JYBSYS2018204)

作者简介:秦楠(1987—)男,山东济宁人,博士,讲师。E-mail:qinnan\_qust@126.com

通讯作者:王永岩(1956—)男,辽宁凌海人,教授,博士生导师。

rect compression extend sparsely to both ends.

**Key words:** cracked similar rocks; creep behavior; uniaxial compressive strength; failure mode; secondary crack

## 0 引言

地下岩体经历长期的地质年代作用,具有非常复杂的特性。因岩体中分布着不均的空隙和裂隙,且夹杂着空气、地下水等流体,所以岩体又被称为多相复合多孔介质材料。试验研究证明,岩石、混凝土材料的脆性破坏都是其内部微破裂产生、发展、演化和汇合的综合结果,但由于其材料内部裂隙的随机性和不可控,外部载荷作用后,通常会在多个方向上形成主裂隙,并且裂隙的贯穿程度也各不相同。因此,开展裂隙岩体强度、蠕变以及次生裂纹的扩展规律的研究,对边坡防护、矿山开采、隧道开挖等岩体工程的设计、支护和长期稳定性具有重要的理论和实践意义<sup>[1-3]</sup>。

近年来,针对裂隙岩石的力学性质和蠕变特性,国内学者们<sup>[4-6]</sup>进行了大量的试验研究。针对完整大理岩试件4个阶段(裂隙压密、弹性、裂隙稳定扩展和非稳定扩展),蔡燕燕等<sup>[7]</sup>进行了蠕变预处理试验,主要控制应力水平和时间,完成蠕变试验后再进行单轴压缩试验,研究了大理岩变形和强度特性的变化规律。在不同应力水平单轴逐级加载条件下,陈辰等<sup>[8]</sup>对岩石试件进行了蠕变试验,当轴向应力较低时,结果不明显,岩石的蠕变应变较小,当应力较大时,岩石蠕变应变逐步增大,结论是岩石蠕变应变与应力成正比关系。针对预制含软弱夹层的复合岩体,LI等<sup>[9]</sup>在不同应力水平条件下进行了单轴蠕变试验,并利用ANSYS模拟研究了含软弱夹层复合岩体的蠕变特性。基于粘弹性断裂理论和Betti互等定理,在静水压力和单轴压力作用下,YANG等<sup>[10]</sup>推导了裂隙岩体的蠕变柔度公式,讨论了在静水压力作用下裂隙岩体的蠕变稳定性,引入裂隙相互作用,并利用自洽理论分析了裂隙岩石蠕变柔度随泊松比和裂隙密度参数的变化规律。为分析岩石长期强度的尺寸效应,王青元等<sup>[11]</sup>对7个不同尺寸的岩样做了单轴蠕变数值模拟研究。针对干燥、自然、不饱水、饱水4种含水状态和0°、30°、60°、90°、不含层理5种层理下的页岩试样,唐建新等<sup>[12]</sup>改变含水和层理状态,对以上试件进行单轴蠕变试验,得到了页岩的蠕变特性。对于预制单裂隙类岩石试件,王永岩等<sup>[13]</sup>做了单轴压缩、三轴压缩和蠕变试验研究,得到了类岩石试件的蠕变特性、强度与裂隙角度的关系。陈新等<sup>[14]</sup>对不同节理倾角和节

理连通率的张开预制裂隙石膏试件进行单轴破坏试验,分析了节理倾角和节理连通率的连续变化对裂隙岩体单轴压缩强度、变形、弹性模量以及应力-应变曲线的影响。李书忱等<sup>[15]</sup>通过开展对水泥、砂子、水、减水剂按照质量比为1.0:2.6:0.35:0.02预制的贯穿节理类岩石试件的单轴压缩试验,系统分析了贯穿节理类岩石试件破坏形式、峰后残余强度、峰后视泊松比等与裂隙倾角(15°、30°、40°、45°、50°、60°)之间的关系,发现峰值强度和峰后残余强度随裂隙倾角的变化规律大体一致,都是随裂隙倾角的增大而减小,而且试件峰后的破坏模式与裂隙倾角有关。

尽管上述研究大多集中在压缩破坏试验和蠕变试验,研究对象是多种裂隙岩石与类岩石,并讨论了在单轴、三轴等试验条件下裂隙岩石与类岩石的强度和蠕变特性,但鲜有报道关于裂隙岩石的强度和裂纹扩展规律在蠕变作用完成后的演变过程。因为在工程实际中,除了承受原始应力,岩体还在时间效应作用下遭受外界载荷作用甚至后续开挖扰动。为了研究蠕变作用后裂隙岩体在单轴压缩条件下的破坏模式、强度特性和裂纹扩展规律,针对预制单裂隙类岩石,笔者首先进行了单轴蠕变试验,保持相同时间和应力水平;蠕变试验完成后再进行单轴压缩试验,分析蠕变作用效果,并与直接进行单轴压缩的试件相对比。

## 1 单裂隙类岩石试件制备与试验设计

天然岩石中裂隙无规则分布,大小不可控制,为达到研究目的,笔者提出一种人工配制的类岩石试件,相比天然岩石优势是可以按照试验方案预埋铁片制作不同角度和贯穿裂隙。试验根据相似原理及现有研究成果<sup>[16-20]</sup>,选择水泥、河砂、水为原材料,分别按照2.00:1.00:0.12的质量比制备 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱形类岩石试件,如图1所示。其中,水泥型号为425号普通硅酸盐水泥,河砂粒径为380  $\mu\text{m}$ 。类岩石试件配制时需要圆柱形裂隙试件模具、插片(厚度为0.8 mm)、孔径380  $\mu\text{m}$ 不锈钢筛网、小型电子秤和捣实工具等,如图2所示。预制裂隙试件制备完成12 h应拔出插片进行拆模,并放置在干燥通风的环境下养护7 d,其中裂隙位置在标准圆柱形类岩石试件的中心,裂隙贯穿程度为75%。为了方便对试验结果进行记录和处理,对制备试件

进行编号,分别用 A、B、C、D、E、F 表示裂隙倾角  $\theta$  为  $0^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $75^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$  和无损伤试件。



图1 标准圆柱形类岩石试件

Fig.1 Standard cylindrical similar rock specimen



图2 主要试验工具及圆柱形裂隙试件模具

Fig.2 Main test tools and cylindrical crack specimen molds

试验设备采用 TAW-200 电子式多功能材料力学试验机,此设备由青岛科技大学和长春朝阳试验机厂联合研制而成,稳定性高,加载方式为力控制加载,加载速率为 50 N/s,蠕变加载等级分为 3、6、9、12 kN,时间间隔为 2 h。其中,最大蠕变加载载荷不超过峰值载荷的 80%,整个蠕变行为都发生在稳态蠕变阶段,故属于低应力水平下的蠕变行为。

2 压缩试验结果分析

在相同条件下对同类型试件进行 3 组试验,为保证压密一致性并尽量降低试验数据的离散性,在 3 组试件中挑选密度相近的试验数据,其中直接单轴压缩试验试件的参数见表 1,经过蠕变作用后试件的参数见表 2。

表1 直接单轴压缩试验参数

Table 1 Parameters of direct uniaxial compression test

| 裂隙倾角/( $^{\circ}$ ) | 密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 峰值载荷/kN | 单轴强度/MPa | 弹性模量/GPa |
|---------------------|----------------------------------------|---------|----------|----------|
| $0^{\circ}$         | 1.93                                   | 17.50   | 8.92     | 1.88     |
| $30^{\circ}$        | 1.93                                   | 19.20   | 9.78     | 1.67     |
| $45^{\circ}$        | 1.91                                   | 23.50   | 11.98    | 2.50     |
| $75^{\circ}$        | 1.91                                   | 24.00   | 12.23    | 2.00     |
| $90^{\circ}$        | 1.92                                   | 26.30   | 13.40    | 2.29     |
| 无损                  | 1.92                                   | 28.50   | 14.52    | 1.90     |

表2 蠕变作用后单轴压缩试验参数

Table 2 Parameters of uniaxial compression test after creep

| 裂隙倾角/( $^{\circ}$ ) | 密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 峰值载荷/kN | 单轴强度/MPa | 弹性模量/GPa |
|---------------------|----------------------------------------|---------|----------|----------|
| $0^{\circ}$         | 2.02                                   | 17.16   | 8.74     | 3.30     |
| $30^{\circ}$        | 2.06                                   | 22.25   | 10.32    | 3.79     |
| $45^{\circ}$        | 2.02                                   | 20.14   | 10.26    | 2.93     |
| $75^{\circ}$        | 2.02                                   | 27.50   | 14.01    | 3.57     |
| $90^{\circ}$        | 2.06                                   | 34.35   | 17.50    | 3.69     |
| 无损                  | 2.06                                   | 37.89   | 19.31    | 3.71     |

2.1 蠕变作用后应力-应变曲线的变化

图 3 为直接单轴压缩的应力-应变曲线,蠕变作用后单轴压缩的应力-应变曲线如图 4 所示。由图 3 可知,随裂隙角度减小,直接单轴压缩的强度变小,强度变化规律为无损伤 $>90^{\circ}>75^{\circ}>45^{\circ}>30^{\circ}>0^{\circ}$ ,无裂隙时单轴压缩强度最大,单轴压缩强度随裂隙角度的减小而降低。蠕变作用后单轴压缩强度在裂隙角度  $30^{\circ}$  和  $45^{\circ}$  时略有差异,整体上与直接单轴压缩规律一致。

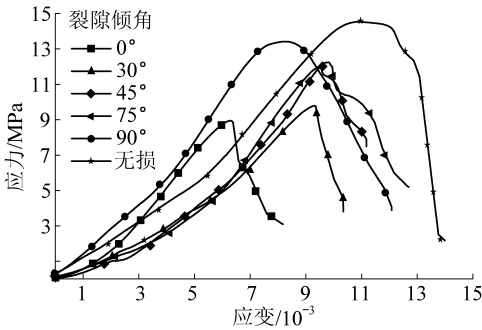


图3 直接单轴压缩应力-应变曲线

Fig.3 Direct uniaxial compression stress-strain curves

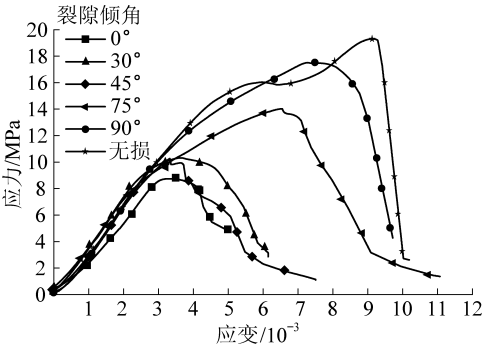


图4 蠕变作用后单轴压缩应力-应变曲线

Fig.4 Uniaxial compression stress-strain curves after creep

不同裂隙角度类岩石应力-应变曲线,如图 5 所示。由图 5a 和图 5b 可得,裂隙倾角为  $0^{\circ}$  和  $30^{\circ}$  时,蠕变对单轴压缩强度的影响程度不大,直接单轴压缩强度与蠕变作用后单轴压缩强度基本相等。在

裂隙倾角为45°时,蠕变作用后单轴压缩强度小于直接单轴压缩强度。裂隙角度为75°、90°、无损伤时,蠕变作用后单轴压缩强度大于直接单轴压缩强度,蠕变起到强化作用,且强化程度随着裂隙倾角的增大也越来越大。当裂隙倾角较小时,蠕变效应影响不大,反而有劣化作用,且倾角越大越明显。在强度曲线方面,包括压密、弹性、塑性和破坏4个阶段,而压密阶段在蠕变作用后不明显,主要原因是在低应力蠕变条件下,内部微裂隙发生闭合,蠕变作用后单轴压缩的峰值应力区域与直接单轴压缩试验相比变大,且随着裂隙倾角变小,这种差异性就越大。图

5a、图5b中直接压缩试验在在应力-应变曲线峰值处出现尖端,达到峰值应力后迅速破坏,反观蠕变作用后的单轴压缩试验峰值前后区域范围较大,但在图5e、图5f中峰值应力区域的差异性不明显。

2.2 蠕变作用后弹性模量的变化

图6为弹性模量随裂隙角度变化的曲线。由图6可知,直接单轴压缩弹性模量明显小于蠕变作用后单轴压缩弹性模量,即在低应力工况下蠕变作用对单轴压缩弹性模量有强化效应,但是随裂隙角度变化,蠕变作用后单轴压缩弹性模量变化规律与直接单轴压缩弹性模量截然相反。

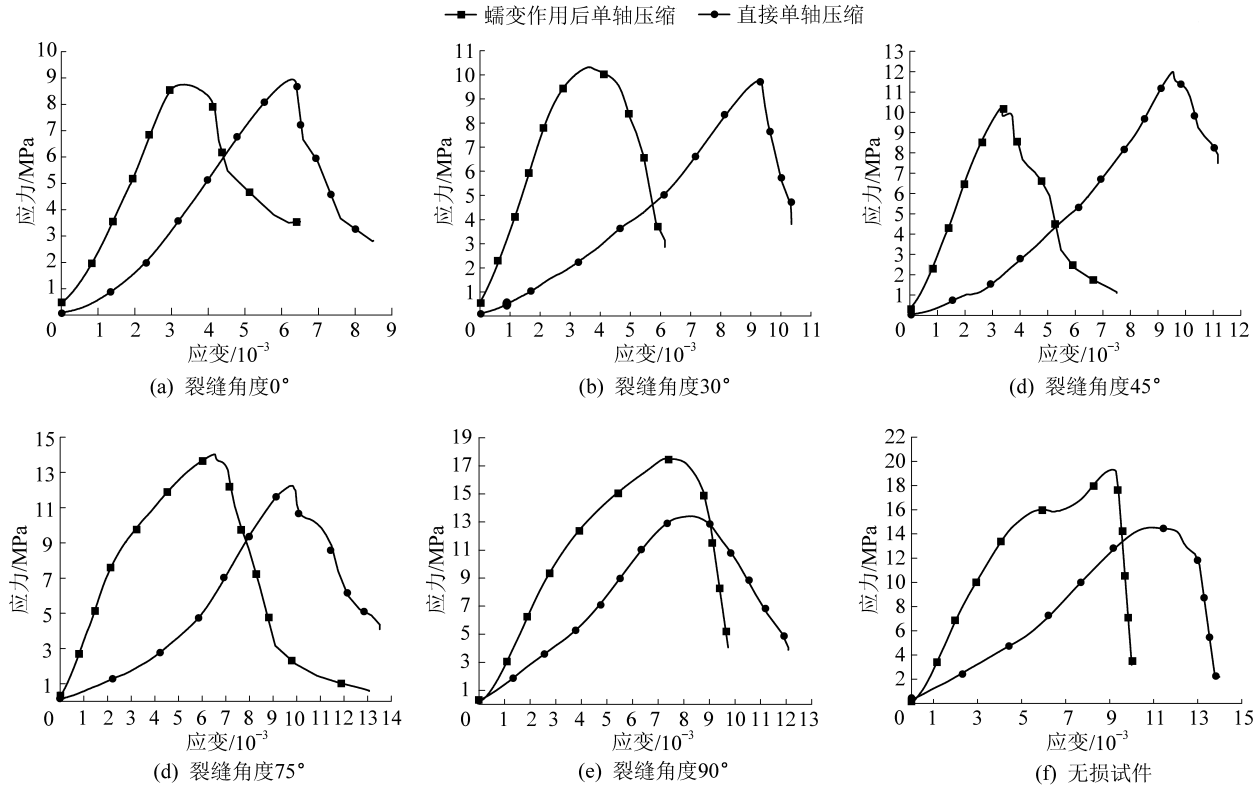


图5 应力-应变曲线  
Fig.5 Stress-strain curves

2.3 蠕变作用后类岩石破坏形式以及裂纹扩展规律

单轴压缩试验条件下单裂隙类岩石裂纹扩展模式如图7所示。其中,直接单轴压缩结果如图7a所示,无损试件首先在端部出现局部破坏,然后次生裂纹随之萌生,裂纹尖端产生应力集中促使次生裂纹逐渐沿轴线向另一端扩展,直至贯通破坏,这种形式属于轴向劈裂破坏;裂隙角度为75°、90°时,情况与无损试件类似,但裂隙扩展时分叉角度较大;0°、30°、45°时,次生裂纹在原生裂纹尖端周围产生并沿轴向延伸,但扩展路径较短。蠕变后单轴压缩类岩石的裂纹扩展规律如图7b所示,裂隙角度75°、90°

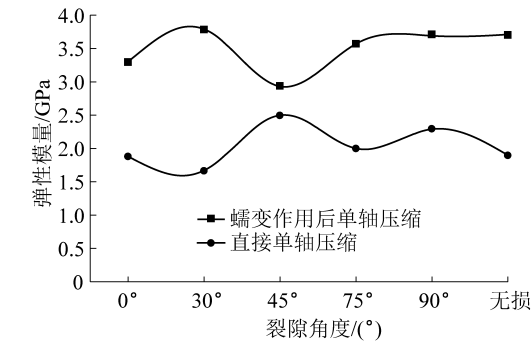


图6 弹性模量随裂隙角度的变化  
Fig.6 Variation of elastic modulus with crack angle

和无损伤时的裂纹扩展规律和直接单轴压缩时的裂纹扩展规律相同;0°、30°、45°时,次生裂纹从原生裂纹尖端周围萌生后并向其他薄弱环节延伸扩展,并非沿轴向往外延伸。综上,裂隙角度的变化,可以影响蠕变作用下单轴压缩裂纹破坏机制和裂纹扩展规律。



(a) 直接单轴压缩



(b) 蠕变作用后单轴压缩

图7 单裂隙类岩石裂纹扩展模式

Fig.7 Cracked propagation pattern of single cracked similar rock

3 结 论

1)蠕变对单裂隙类岩石单轴压缩强度的影响与裂隙角度有关,这种相关性在作用力较低时比较明显。裂隙角度较大时起强化作用,且裂隙角度越大强化作用越明显,在裂隙角度较小时无影响,甚至起劣化作用,但2类试验所得强度变化规律随裂隙角度变化基本一致。

2)有蠕变效应的单轴压缩试验与直接单轴压缩试验相比较缺少了明显的压密阶段,但是小裂隙角度时,峰值应力区域变大。

3)直接压缩和有蠕变效应得到的试件的弹性模量,前者明显较小。随着裂隙角度的变化,直接压缩模量与蠕变作用后弹性模量变化规律相反。

4)直接压缩与蠕变作用后的裂纹扩展规律与裂隙角度有关。当裂隙角度较大时,两者的裂纹扩展规律差异不大;当裂隙角度较小时,两者的裂纹扩展规律区别较大,先蠕变后压缩导致次生裂纹从原生裂纹尖端周围发起,且短裂纹密集,而直接压缩产生的次生裂纹虽然也是从原生裂纹尖端发起,但裂纹稀疏向两端延伸扩展。

笔者主要针对贯穿程度为75%的裂隙类软岩试件研究蠕变作用前后单轴压缩特性变化规律,对于其他贯穿程度情况如25%、50%和100%,虽做了

相关试验,但由于试验数据量和一致性的局限性,没有得出比较明显的规律,可在后续进行进一步研究和探索。

参考文献(References):

[1] 辛亚军,安定超,李梦远.高强度红砂岩峰后分级加载蠕变及强度特征[J].煤炭学报,2017,42(7):1714-1723.  
XIN Yajun, AN Dingchao, LI Mengyuan. Creep and strength characteristics of high strength red sandstone after peak loading [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42 (7): 1714-1723.

[2] 刘正.深部围岩蠕变特性试验研究及其数值模拟[D].湘潭:湖南科技大学,2012.

[3] 袁海平,曹平,万文,等.分级加卸载条件下软弱复杂矿岩蠕变规律研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1575-1581.  
YUN Haiping, CAO Ping, WAN Wen, et al. Study on creep law of weak and complex rock under different loading and unloading conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1575-1581.

[4] 李成波.低应力水平下时间效应对岩石蠕变模型参数的影响[J].安阳师范学院学报,2015(2):10-13.  
LI Chengbo. Effect of time on creep model parameters at low stress level [J]. Journal of Anyang Normal University, 2015(2): 10-13.

[5] 邝泽良.单轴压缩条件下砂岩蠕变变形时效性与声发射特性研究[D].赣州:江西理工大学,2017.

[6] 秦楠,张金龙,王永岩.含不同倾角单裂隙类岩石单轴强度及蠕变速率的研究[J].应用力学学报,2018,35(3):662-667.  
QIN Nan, ZHANG Jinlong, WANG Yongyan. Study on uniaxial strength and creep rate of rocks with different dip angles [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(3): 662-667, 697.

[7] 蔡燕燕,孙启超,俞缙,等.大理岩强度与变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(11):2767-2777.  
CAI Yanyan, SUN Qichao, YU Jin, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of marble after creep action [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (11): 2767-2777.

[8] 陈辰,卓毓龙,王晓军,等.逐级加载条件下岩石蠕变特性研究[J].矿业研究与开发,2016,36(3):60-63.  
CHEN Chen, ZHUO Yulong, WANG Xiaojun, et al. Creep characteristics of rock under successive loading conditions [J]. Mining Research and Development, 2016, 36(3): 60-63.

[9] LI Jianguang, ZHANG Zuoliang, ZHANG Yubiao, et al. Numerical simulation of creep characteristic for composite rock mass with weak interlayer [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2nd International Conference on Civil Engineering and Materials Science. 2017:240-245.

[10] YANG Wendong, GAMAGE Ranjith, HUANG Chenchen, et al. Loading history effect on creep deformation of rock [J]. Energies, 2018, 11(6): 1462.

[11] 王青元,朱万成,刘洪磊,等.单轴压缩下绿砂岩长期强度的尺寸效应研究[J].岩土力学,2016,37(4):981-990.  
WANG Qingyuan, ZHU Wancheng, LIU Honglei, et al. Study on

the size effect of long-term strength of green sandstone under uniaxial compression [J].Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 981-990.

[12] 唐建新,腾俊洋,张 闯,等.层状含水页岩蠕变特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(S1):33-41.  
TANG Janxin, TENG Junyang, ZHANG Chuang, *et al.* Experimental study on creep characteristics of stratified water-bearing shale [J].Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1):33-41.

[13] 王永岩,张金龙,张余标.裂隙类岩石强度特性及蠕变模型的实验研究[J].科学技术与工程,2018,18(18): 94-100  
WANG Yongyan, ZHANG Jinlong, ZHANG Yubiao. The experimental investigation of single fracture rock strength characteristics and creep model by experiment[J].Science Technology and Engineering, 2018, 18(18): 94-100.

[14] 陈 新,廖志红,李德建.节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011, 30(4):781-789.  
CHEN Xin, LIAO Zhihong, LI Jiande. Uniaxial compression test of joint inclination and connectivity on rock mass strength and deformation [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (4):781-789.

[15] 李树忱,汪 雷,李术才,等.不同倾角贯穿节理类岩石试件峰后变形破坏试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013, 32 (S2):3391-3395.  
LI Shushen, WANG Lei, LI Shucai, *et al.* Experimental study on post-peak deformation and failure of rock specimens with perforation joints with different dip angles[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2):3391-3395.

[16] 秦楠,张金龙,王永岩.不同加载方式和速率对类软岩单轴抗压强度影响的实验研究[J].应用力学学报,2018,35(5): 1158-1163,1193.  
QIN Nan, ZHANG Jinlong, WANG Yongyan. Experimental study on the effect of different loading modes and rates on uniaxial compressive strength of soft rock-like rocks [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(5): 1158-1163, 1193.

[17] 秦楠.压力和温度对类软岩强度、损伤耗能及蠕变影响的研究[D].青岛:青岛科技大学,2014.

[18] 甘小南.石蜡、砂、石膏作为软岩相似材料的力学性能实验研究[D].青岛:青岛科技大学,2017.

[19] 李剑光.含倾斜软弱夹层复合岩体强度及蠕变特性研究[D].青岛:青岛科技大学,2015.

[20] 韩建新,李术才,李树忱,等.贯穿裂隙岩体强度和破坏方式的模型研究[J].岩土力学,2011,32(S2):178-184.  
HAN Jianxin, LI Shucai, LI Shuchen, *et al.* Model study on strength and failure mode of fractured rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (S2): 178-184.