

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.01.15

绿泥石千枚岩力学性质及其饱水劣化机制

周 阳, 苏生瑞, 李 鹏, 索蔚辰

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对工程中常见的千枚岩,进行了不同片理角度的压缩试验以及相关的 SEM 测试,分析了片理面和含水量对其力学性质和破坏模式的影响以及千枚岩的软化机理。研究表明:(1)不同片理角度千枚岩的应力-应变曲线大体一致,都经历了压密段、弹性段、屈服段和破坏段;饱水岩样的屈服段更加明显,峰值应变增加,应力-应变曲线跌落变缓。(2)千枚岩的各向异性显著,片理角度从 0°到 90°,弹性模量呈倒 S 型变化规律,变形模量和抗压强度呈先减小后增大的 U 型变化规律;饱水千枚岩的弹性模量和变形模量分别下降了 41.63% ~ 47.38%, 37.44% ~ 43.02%, 强度软化系数为 0.49 ~ 0.70, 其中 $\beta = 30^\circ$ 时软化系数最小。(3)千枚岩的破坏模式可分为 3 种类型:张拉劈裂破坏,剪切滑移破坏和张拉-剪切复合破坏。饱水试样的破碎程度低,脆性减弱,剪切破坏增强。(4)黏土矿物颗粒吸水膨胀、颗粒间胶结物溶解,使得黏土矿物软化、剥落,岩体结构变得松散,这些微结构的改变导致了千枚岩力学性质的劣化。

关键词: 绿泥石千枚岩;各向异性;饱水状态;劣化;微观结构

中图分类号: TU313

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)01-0095-07

Mechanical properties of chlorite phyllite and its degradation mechanism under saturated state

ZHOU Yang, SU Shengrui, LI Peng, SUO Weichen

(College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Compression tests and SEM measurement were carried out on phyllite to study the influences of schistosity and water on the mechanical properties, failure modes and softening mechanism of the phyllite were analyzed. The results show that: while the schistosity angles are different the stress-strain curves have basically the same shape with a compaction stage, an elastic stage, a yielding stage and a failure stage. The yield stage of saturated samples is more obvious, the peak strain increases, the stress-strain curve drops slowly; The elastic modulus shows an inverted S-shape and the deformation modulus and compressive strength decrease firstly and then increase shows a U-shaped curve as the schistosity angle varies from 0° to 90°. The elastic modulus and deformation modulus of saturated phyllite decrease by 41.63% to 47.38% and 37.44% to 43.02% respectively. The softening coefficient is 0.49 to 0.70 and reaches minimum while the angle is 30°; the failure modes of phyllite can be divided into three types: tension-splitting failure, shear-slip failure and tension-shear composite failure. The brittleness of saturated samples is weakened and the shear failure is strengthened; because dissolution of cements among mineral particles and the swell of clay minerals, clay minerals are softened and exfoliated, so the rock mass structure become loose. These microstructure changes resulted in the degradation of mechanical properties.

Keywords: chlorite phyllite; anisotropy; saturated state; degradation; microstructure

收稿日期: 2019-04-12; 修订日期: 2019-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(4183000182)

第一作者: 周 阳(1989-),男,博士,主要从事地质灾害和岩石力学方面的研究。E-mail: zhoul1020@126.com

0 引言

千枚岩作为一类特殊的软岩,遇水易产生膨胀变形且具有各向异性,其在工程建设中普遍存在。千枚岩的力学性质对边坡、隧道以及地下工程的稳定性具有重要的影响。许多学者已经对千枚岩的物理力学性质展开了研究,如刘云鹏等^[1]分析了千枚岩在垂直和平行片理面方向的断口形貌特征。吴永胜等^[2-3]研究了不同加载方位角度千枚岩的扩容特性和各向异性。蒲超等^[4]研究了三轴压缩条件下千枚岩的破裂形式与能量特征。陈子全等^[5]研究了碳质千枚岩的力学特性和能量损伤演化机制。郑达等^[6]和周阳等^[7]研究了千枚岩的微结构与力学性质。赵建军等^[8]研究了饱水条件下千枚岩的软化效应。HU 等^[9]研究了不同饱水状态下千枚岩的力学特性。XU 等^[10-11]研究了千枚岩在三轴压缩和巴西劈裂条件下的各向异性。REN 等^[12]研究了千枚岩的剪切流变特性。QIU 等^[13]研究了低变质千枚岩的动态破坏特征。MISHRA 等^[14]研究了千枚岩在高应变速率下的动态响应特征。

上述研究大多专注于千枚岩在垂直和平行片理面方向上的各向异性,其遇水易软化的性质研究较少,部分学者仅分析了单一片理角度下千枚岩力学性质的软化效应,也没有从微观角度分析其软化机理。因此,笔者开展了不同片理角度干燥与饱水绿泥石千枚岩的单轴压缩试验,分析其力学性质和变形破坏特征,并结合 SEM 分析绿泥石千枚岩的软化机理,研究成果可为以千枚岩为载体的工程建设及地质灾害的防治提供参考。

1 试验设计方案

试验所用样品取自于四川省阿坝州理县某处崩塌(图 1),微风化,属于志留系茂县群绿泥石千枚岩。根据国际岩石力学协会(ISRM)的要求,将现场取回的岩块制备成直径约 50 mm,长度约 100 mm 的圆柱型试样(图 2)。同时,根据纵波波速和密度严格选样,剔除离散性较大的样品。将制备好的试样分成两组,一组直接置于 105 ℃烘箱中烘干 48 h 至恒重;另一组样品先烘干再采用真空抽气法进行强制饱水。在 RMT-150C 型电液伺服控制刚性压力机上进行单轴压缩试验,采用荷载控制方式,加载速率为 0.5 MPa/s,直至岩样破坏,每组试验做 2~3 个试样,以取平均值。采用 Quanta 650 多功能环扫描电镜对干燥和饱水样品进行微观分析。



图 1 取样位置

Fig. 1 Sampling point

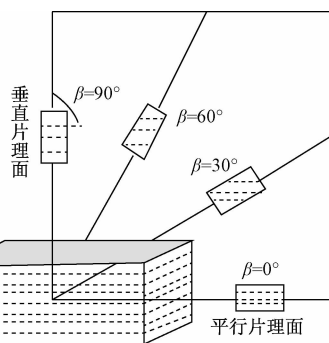


图 2 试样加工示意图

Fig. 2 Diagram of coring rock sample

2 试验结果及分析

2.1 绿泥石千枚岩的变形特征

干燥和饱水状态下典型试样的单轴压缩应力-应变曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出两种状态下,不同片理角度绿泥石千枚岩样品在加载过程中应力-应变曲线都经历了压密阶段、弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段,但 $\beta = 30^\circ$ 时样品压密段和屈服段不太明显,仅在压缩的起始位置和即将失效处出现。相同片理角度条件下,饱水试样的屈服阶段更加明显,峰值强度降低,峰值应变增加,应力-应变曲线跌落趋势变缓,绿泥石千枚岩软化特征明显。

根据单轴压缩试验结果,对干燥和饱水绿泥石千枚岩的峰值应力,峰值应变,弹性模量和变形模量的平均值进行了统计(表 1)。

由表 1 可以看出,绿泥石千枚岩的力学参数呈现出明显的各向异性,并且饱水试样的抗压强度、弹性模量和变形模量减小,峰值应变增大。不同片理角度和含水状态下绿泥石千枚岩各力学参数具体变化趋势如图 4、图 5 所示。

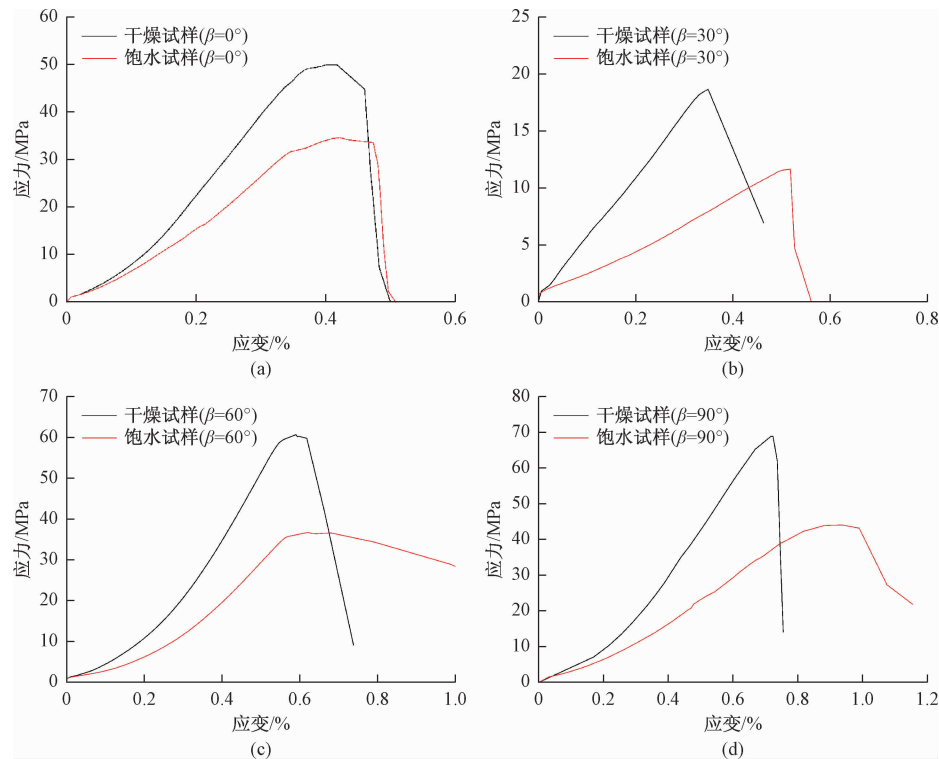


图 3 典型试样的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of typical specimens

表 1 绿泥石千枚岩的力学参数					
Table1 Mechanical parameters of chlorite phyllite					
岩样类型	角度/(°)	峰值应力/ MPa	峰值应变/ %	弹性模量/ GPa	变形模量/ GPa
干燥绿泥石 千枚岩	0	62.38	0.54	17.38	11.97
	30	25.39	0.37	7.78	6.58
	60	60.61	0.64	14.63	8.16
	90	67.23	0.78	12.41	8.02
饱水绿泥石 千枚岩	0	43.36	0.58	9.85	7.49
	30	12.47	0.46	4.10	3.95
	60	35.85	0.76	8.54	4.81
	90	41.43	0.97	6.53	4.57

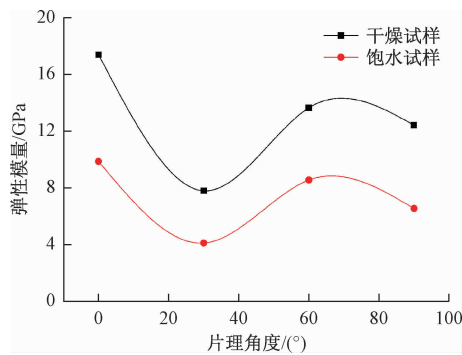


图 4 弹性模量随片理角度的变化曲线

Fig.4 Variation of elastic modulus with change of schistosity angle

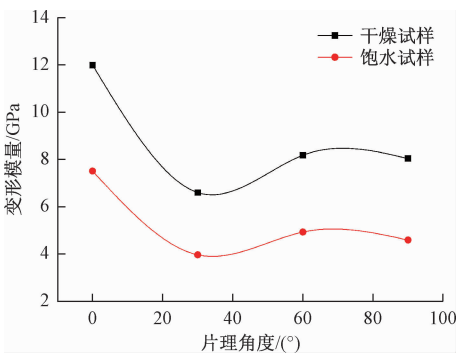


图 5 变形模量随片理角度的变化曲线

Fig.5 Variation of deformation modulus with change of schistosity angle

从图 4 中可以看出,片理角度对弹性模量的影响显著,随着片理角度的增大,岩样的弹性模量呈先减小后增大的倒 S 型变化规律,这与黄宏伟等^[15]的研究结果基本一致。当 $\beta = 0^\circ$ 时,试样弹性模量取得最大值, $\beta = 30^\circ$ 时弹性模量值最小。

如图 5 所示,随着片理角度的增大,试样的变形模量呈先减小后增加的宽缓 U 型变化规律,并且变化幅度较大。样品的变形模量与弹性模量变化规律并不完全一致,这可能有两方面的因素:①片理面相对软弱、刚度低,在加载初期会产生较大的轴向压密变形,从

0°到90°压密阶段差别较大,这从图3的应力-应变曲线中可以看出;②试样的抗压强度随片理角度呈现先减小后增大的U型变化规律,对应的50%抗压强度也呈现相同的变化趋势。这两方面因素的共同作用导致了试样变形模量与弹性模量呈现不一样的变化规律。

饱水状态下绿泥石千枚岩的弹性模量和变形模量降低趋势非常明显。相比干燥状态,片理角度从0°到90°,饱水绿泥石千枚岩的弹性模量分别降低了43.33%、47.30%、41.63%和47.38%;变形模量分别降低了37.44%、39.97%、41.05%和43.02%。

干燥和饱水绿泥石样品的峰值应变如图6所示。相同片理角度下,饱水试样的峰值应变大于干燥试样, $\beta=0^\circ$ 试样的峰值应变的增加幅度最小, $\beta=90^\circ$ 试样的峰值应变增加幅度最大,单轴压缩时,饱水千枚岩试样的峰值应变相对于干燥试样增大了6.80%~25.27%。

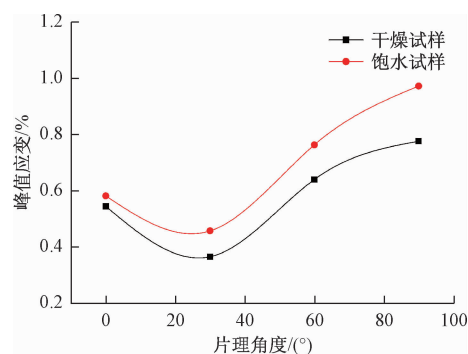


图6 峰值应变随片理角度的变化曲线

Fig.6 Variation of peak strain with change of schistosity angle

2.2 绿泥石千枚岩的强度特征

干燥和饱水绿泥石千枚岩的抗压强度如图7所示。随片理角度的增加,绿泥石千枚岩的抗压强度呈先减小后增加的U型变化规律, $\beta=0^\circ$ 和 90° 样品的抗压强度较大, $\beta=30^\circ$ 样品的抗压强度最小。片理角度从0°到30°,抗压强度迅速减小;而片理角度从30°到90°时,抗压强度缓慢增加。水对绿泥石千枚岩的软化作用明显,相比于干燥状态,饱水千枚岩试样的抗压强度明显降低,片理角度从0°到90°,其软化系数分别为0.70、0.49、0.59和0.62, $\beta=30^\circ$ 时绿泥石千枚岩的软化系数最小,对水最为敏感。

2.3 绿泥石千枚岩的破裂特征

绿泥石千枚岩的变形特征和力学性质与其破坏模式密切相关,其破裂模式受片理结构面和含水量的影响显著。干燥和饱水状态下,典型绿泥石千枚岩试样

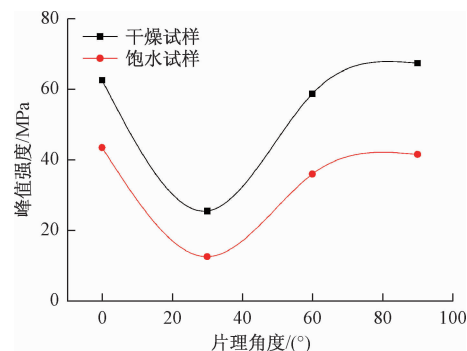


图7 抗压强度随片理角度的变化曲线

Fig.7 Variation of compressive strength with change of schistosity angle

的破坏模式如表2所示。

表2 绿泥石千枚岩的破坏模式及控制因素

Table 2 The failure modes and controlling factors of chlorite phyllite

片理角度 / (°)	破裂形态		破坏模式	主控因素
	干燥试样	饱水试样		
0			顺片理面的张拉劈裂破坏	片理面
30			沿片理面的剪切滑移破坏	片理面
60			干燥试样:局部切穿片理面和局部顺片理面的复合张剪破坏; 饱水试样:局部切穿片理面和局部沿片理面的剪切破坏	片理面和基质体
90			干燥试样:切穿片理面的复合张剪破坏; 饱水试样:切穿片理面的剪切破坏	片理面和基质体

(1) $\beta=0^\circ$ 时,试样顺片理面形成张拉劈裂破坏。破坏的岩样存在多个近似相互平行的破裂面,这些破裂面基本与片理面重合并将岩样分割成多个独立的

“薄板”,干燥试样在继续加载的过程中,岩板受压而弯曲,甚至发生折断,具有较强脆性破坏特征。

(2) $\beta = 30^\circ$ 时,试样沿片理面形成剪切滑移破坏。干燥试样局部发育有脆性裂隙,破裂面不平整;饱水试样破裂面光滑平整、贯通整个岩样,并发生明显的剪切滑移。

(3) $\beta = 60^\circ$ 时,干燥试样为局部切穿片理面和局部顺片理面的复合张剪破坏,主破裂面呈多段折线型,并且其周围有较大的张拉裂隙。饱和试样为局部切穿片理面和局部沿片理面的剪切滑移破坏。

(4) $\beta = 90^\circ$ 时,干燥试样形成切穿片理面的压致张裂和剪切滑移的Y型复合破坏,岩样破碎程度比较严重;饱水试样为单一的贯穿片理面的剪切破坏。

干燥绿泥石千枚岩与饱水绿泥石千枚岩破裂特征

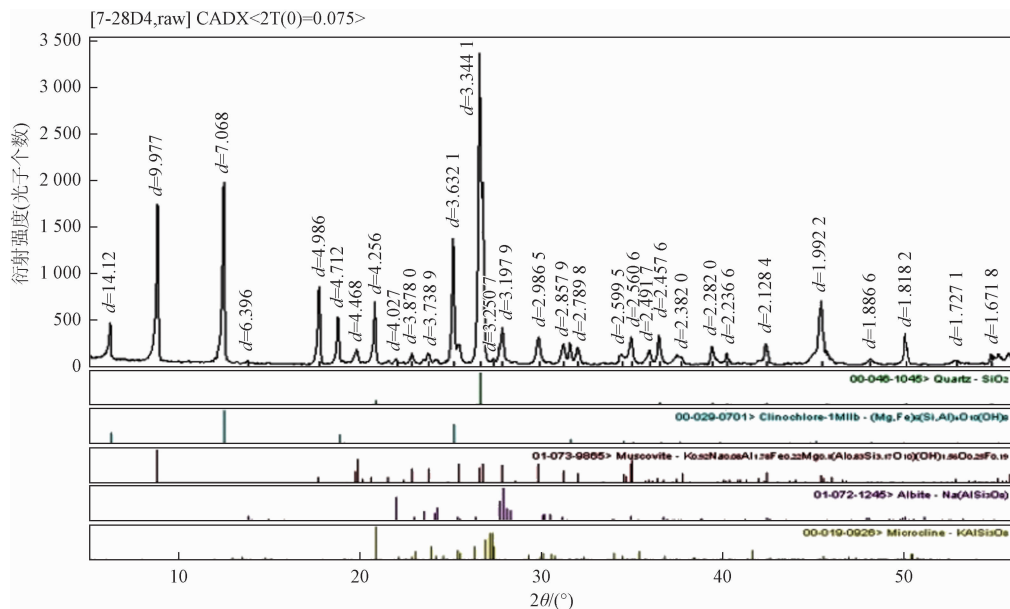


图8 样品粉晶X衍射谱

Fig. 8 X-ray diffraction spectrum of sample powder

样品中的黏土矿物主要是伊利石和绿泥石,在饱水过程中水分子很容易进入黏土矿物颗粒之间形成极化的水分子层。如伊利石矿物颗粒较小、亲水性较强,并且矿物晶体在C轴方向连接力较小,在饱水过程中水分子进入晶体结构层间,形成水化膜,导致伊利石矿物大幅度膨胀^[15-16]。伊利石在饱水状态下膨胀量约为50%~60%^[17]。当黏土矿物吸水膨胀时,样品中的裂隙被充填,黏土矿物失去了继续膨胀的空间。由于黏土矿物和裂隙的分布是不均匀的,因此颗粒之间产生了附加应力,进而引起黏土矿物颗粒周围产生非均匀变形,破坏了样品内部结构,增大了黏土矿物与水的接触面积,进一步加剧了黏土矿物的膨胀、变形脱

具有明显的差别。干燥状态下试样主裂破裂面周围伴有大量次生张拉裂纹,破碎程度较高,具有更强的脆性破坏特征;而饱水状态下,绿泥石千枚岩的延塑性增强,力学性质和脆性被弱化,表现出张拉破坏减弱,剪切破坏增强的特征,并且试样的次生裂纹较少,破碎程度低,破坏面完整度较高。

3 饱水对绿泥石千枚岩的劣化机制

绿泥石千枚岩的水理性质与其矿物成分密切相关,为了研究千枚岩的软化机理,对样品进行了粉晶X衍射(图8),结果显示样品主要由绿泥石,伊利石,石英,斜长石和钾长石组成,其质量百分比分别为36%,38%,13%,12%和1%。

落以及颗粒间胶结物的溶蚀。绿泥石千枚岩遇水后经历了黏土矿物吸水膨胀、孔隙充填、非均匀变形和胶结物溶蚀等阶段,从而造成了其力学性质的劣化。

为了更直观的分析饱水对绿泥石千枚岩的软化,对干燥和饱水样品分别进行了SEM测试,如图9和10所示。

由图9中可以看出,绿泥石千枚岩由片状矿物和粒状矿物胶结而成,片理结构发育。粒状矿物棱角分明,为不规则多边形,片状矿物表面平直光滑。矿物颗粒轮廓界限清晰明显,黏土矿物颗粒之间多以面-面、面-边接触,局部微裂隙发育。

在饱水状态下(图10),由于黏土矿物的吸水膨胀

和胶结物的溶蚀,出现明显的絮状结构,矿物颗粒间的界面变得模糊。片状黏土矿物软化、剥落比较明显,剥落物分解成近似椭圆形的絮状小颗粒,附着在大矿物

颗粒表面。在饱水状态下,黏土矿物颗粒之间的接触关系逐渐转变为点-面接触,样品结构逐渐趋于松散、多孔隙,这导致了饱水绿泥石千枚岩力学特性的劣化。

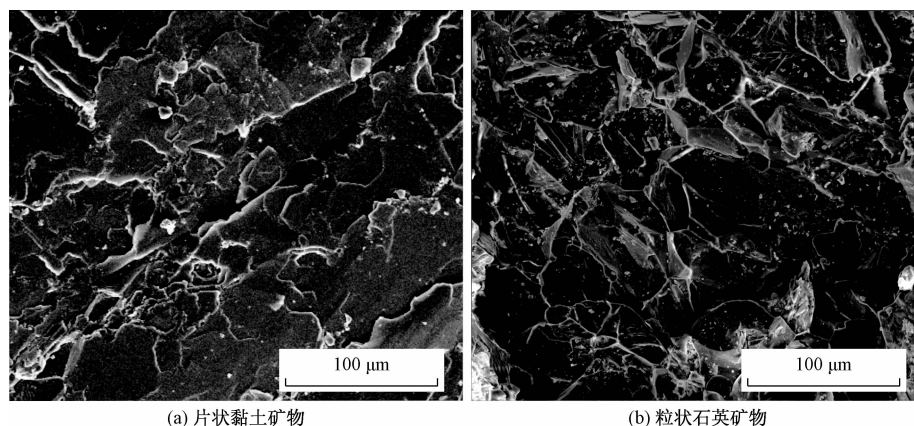


图 9 干燥样品 SEM 照片

Fig. 9 SEM photographs of dry samples

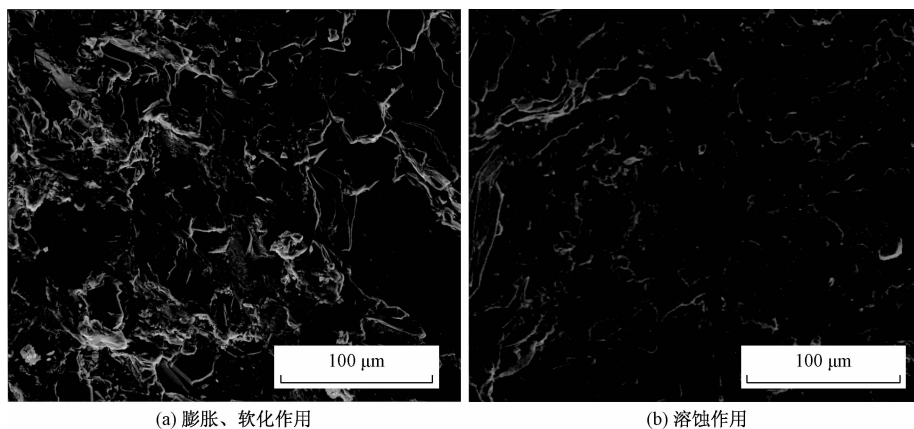


图 10 饱水样品 SEM 照片

Fig. 10 SEM photographs of saturated samples

4 结论

(1)不同片理角度千枚岩的应力-应变曲线都经历了压密段、弹性段、屈服段和破坏段;饱水试样的屈服阶段更加明显,峰值强度降低、峰值应变增加,应力-应变曲线跌落变缓。

(2)千枚岩各向异性显著,片理角度从 0° 到 90° ,弹性模量呈倒S型变化规律;变形模量和抗压强度先减小后增大呈U型变化规律。饱水试样的弹性模量和变形模量分别下降了41.63%~47.38%,37.44%~43.02%;从 0° 到 90° 饱水千枚岩强度软化系数分别为0.70,0.49,0.59和0.62, $\beta=30^{\circ}$ 时千枚岩软化系数最小,对水最为敏感。

(3)绿泥石千枚岩的破坏模式与片理角度和含水率密切相关,可分为3种类型:张拉劈裂破坏,剪切滑移破坏和张拉-剪切复合破坏。饱水千枚岩主破裂面完整、次生裂隙少、脆性破坏减弱、剪切破坏增强。

(4)饱水状态下,伊利石、绿泥石等黏土矿物颗粒吸水膨胀,颗粒间胶结物溶解破坏,使得黏土矿物软化、剥落,岩体结构变得松散,这些微观结构的改变直接导致了绿泥石千枚岩力学性质的劣化。

参考文献:

- [1] 刘云鹏,邓辉,黄润秋.板裂结构岩石力学试验及破裂断口细观地貌特征分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊2):3852-3861. [LIU Y P, DENG H, HUANG R Q. Mechanical test of slabrent

- structure rock and mesoscopic morphology analysis of rupture surface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (Supp2): 3852 – 3861. (in Chinese)
- [2] 吴永胜, 谭忠盛, 余贤斌, 等. 不同加载方位角下单轴压缩千枚岩扩容特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2747 – 2754. [WU Y S, TAN Z S, YU X B, et al. Dilatancy behavior of phyllite in uniaxial compressive tests under different loading azimuths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2747 – 2754. (in Chinese)]
- [3] 吴永胜, 谭忠盛, 喻渝, 等. 川西北茂县群千枚岩各向异性力学特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 207 – 215. [WU Y S, TAN Z S, YU Y, et al. Anisotropically mechanical characteristics of maonian group phyllite in northwest of Sichuan Province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 207 – 215. (in Chinese)]
- [4] 蒲超, 孟陆波, 李天斌. 三轴压缩条件下千枚岩破裂与能量特征研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 359 – 366. [PU C, MENG L B, LI T B. Rupture and energy properties of phyllite under triaxial compression condition[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 359 – 366. (in Chinese)]
- [5] 陈子全, 何川, 吴迪, 等. 深埋碳质千枚岩力学特性及其能量损伤演化机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 445 – 456. [CHEN Z Q, HE C, WU D, et al. Mechanical properties and energy damage evolution mechanism of deep-buried carbonaceous phyllite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 445 – 456. (in Chinese)]
- [6] 郑达, 巨能攀. 千枚岩岩石微观破裂机理与断裂特征研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(3): 317 – 322. [ZHENG D, JU N P. Scanning electronic microscope tests for rock micro-rupture mechanism and fracture characteristic of phyllite[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(3): 317 – 322. (in Chinese)]
- [7] 周阳, 苏生瑞, 李鹏, 等. 板裂千枚岩微观结构与力学性质[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(2): 504 – 513. [ZHOU Y, SU S R, LI P, et al. Microstructure and mechanical properties of broken phyllite[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(2): 504 – 513. (in Chinese)]
- [8] 赵建军, 解明礼, 李涛, 等. 饱水条件下千枚岩软化效应试验分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1449 – 1454. [ZHAO J J, XIE M L, LI T, et al. Softening of effect of phyllite with water saturation [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6): 1449 – 1454. (in Chinese)]
- [9] HU K F, WANG X. Experimental research on mechanical property of phyllite tunnel surrounding rock under different moisture state [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2016, 35(1): 1 – 9.
- [10] XU G, HE C, CHEN Z, et al. Transverse isotropy of phyllite under brazilian tests: laboratory testing and numerical simulations[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 51(4): 1111 – 1135.
- [11] XU G W, HE C, SUN A, et al. Experimental investigation of the anisotropic mechanical behavior of phyllite under triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104(2): 100 – 112.
- [12] REN G M, DUAN X Q, JIA X Y. Shear rheological properties of sericite-greisen phyllite [C]. Switzerland: Trans Tech publication, 2012: 616 – 618.
- [13] QIU J, LI D, LI X. Dynamic failure of a phyllite with a low degree of metamorphism under impact brazilian test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 2017, 94: 10 – 17.
- [14] MISHRA S, MEENA H, PARASHAR V, et al. High strain rate response of rocks under dynamic loading using split hopkinson pressure bar [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36: 531 – 549.
- [15] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 866 – 870. [HUANG H W, CHE P. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of sandstone [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(7): 866 – 870 (in Chinese)]
- [16] 杨魁, 李贞. 蒙脱石吸水膨胀结构特征分析[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(5): 1154 – 1158. [YANG K, LI Z. Research on montmorillonite hydration expansion mechanism [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(5): 1154 – 1158. (in Chinese)]
- [17] 朱效嘉. 软岩的水理性质[J]. 矿业科学技术, 1996, 4(3): 46. [ZHU X J. Characteristics of soft rocks interacting with water [J]. Scientific Technology of Mining, 1996, 4(3): 46. (in Chinese)]