

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201806115

石英云母片岩结构特征及其物理模拟

梁 恒^{1,2},张传庆^{2,3},周 辉^{2,3},崔国建^{2,3},何思明^{1,4}

(1. 山地灾害与地表过程重点实验室(中国科学院成都山地灾害与环境研究所),成都 610041;
2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 岩土力学与工程国家重点实验室(中国科学院武汉岩土力学研究所),
武汉 430071; 4. 中国科学院青藏高原卓越中心,北京 100101)

摘 要: 石英云母片岩为典型片理岩石,以其特有的片理构造区别于层理或层状岩石,造成其破坏机制区别于常规意义上的层理或层状岩石. 由于石英云母片岩石遇水易崩解,片理面倾角变化剧烈,造成系统多角度定向取样难度大,岩石变异性大,进一步导致其力学试验难以系统开展,而通过相似材料物理模拟试验定性探究岩石力学特性及行为方式是岩石力学领域经常采用的研究方法. 首先,采用电镜扫描和偏光显微镜揭示石英云母片岩的结构和构造特征,并根据室内试验结果,从宏观及微观角度对石英云母片岩的变形破坏机制进行分析;其次,为较好模拟和体现片理构造特征发明一种制作片理岩石相似材料的装置和方法,并制作获得了相应的物理模拟材料. 最后,通过不同片理面倾角单轴和三轴试验,研究此相似材料的力学行为、破坏特征及力学参数随片理面倾角和围压的变化规律. 基于物质结构表现分析和力学试验结果对比验证所制作片理岩石相似材料装置的可靠性、方法的可行性及材料本身的相似性.

关键词: 片理岩石;相似材料;结构特征;破坏特征;片理倾角

中图分类号: TU458 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)08-0111-09

Structural characteristics and physical simulation of quartz-mica schist

LIANG Heng^{1,2}, ZHANG Chuanqing^{2,3}, ZHOU Hui^{2,3}, CUI Guojian^{2,3}, HE Siming^{1,4}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process (Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences), Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering (Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Wuhan 430071, China; 4. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The quartz-mica schist is a typical schistosity rock and its structural features are distinct from stratified or layered rocks. Its specific property leads to different deformation and failure mechanism between the quartz-mica schist and stratified or layered rock. Because the quartz-mica schist is easy to disintegrate in water and the angle of schistosity plane can change significantly, it is difficult to systematically carry out the mechanical test of the rock samples with different angles due to sampling difficulties and rock variability. As a research method commonly used in the field or rock mechanics, physical simulation method conducted on similar materials is frequently used to qualitatively explore the mechanical properties and behavior of rocks. The structure and tectonic characteristics of the quartz-mica schist were revealed by electron microscopy and polarized light microscopy, and the deformation and failure mechanism was analyzed from macroscopic and microscopic perspectives according to the experimental result. The device and method for making materials similar to schistosity rock were developed, and the corresponding physical simulation material was obtained. The mechanical behavior, failure characteristics, and mechanical parameters of the similar material were studied by means of uniaxial and triaxial tests. Based on the apparent analysis of material structure and the results of mechanical tests, the reliability of the device, the feasibility of the proposed method, and the similarity of the material itself were verified.

Keywords: schistosity rock; similar material; structural characteristic; failure characteristic; schistosity angle

片理构造是变质岩中常见的构造类型,片理面

通常为结构弱面,呈定向平行排布. MaCabe 等^[1-2]针对片岩的研究结果表明,片理面是结构弱面,其倾角对岩石的强度和弹性模量有明显的影响,使岩石具有明显的横观各向同性特征,岩石的破坏特征也与片理倾角有着极大关系. 然而,片理岩石现场取芯存在遇水分解和定向取样难度大的问题,由此经常导致室内试验无法获得系统性成果.

收稿日期: 2018-06-18
基金项目: 国家自然科学基金(51279201,41272346); 中铁二院科学技术研究计划项目(院计划 13164196(13-15))
作者简介: 梁 恒(1991—),男,博士研究生;
张传庆(1977—),男,研究员,博士生导师;
周 辉(1972—),男,研究员,博士生导师;
何思明(1968—),男,研究员,博士生导师
通信作者: 梁 恒,zkysdlh@163.com

作为一种典型的横观各向同性体,层理或层状岩石的现场取芯也经常遇到类似问题,学者们通常在实验室制作相应的相似材料开展力学试验,如在均质材料中加入平行的人造节理面^[3]模拟节理岩石,或使用两种不同力学性质的材料制作交互层状试样^[4-6],采用此类方法制作的相似材料在结构特征和力学行为上与层状岩石具有很好的相似性,在研究中得到了广泛运用。

根据相似性原理,相似材料应当与原岩的物理力学性质相似^[7]。由于层状或层理岩石具有明显的层厚且岩石的单层厚度变化较大^[8],单一岩层的力学参数可以通过试验获得,进而可以制作其相似材料。郭从军等^[9-10]通过制作层状复合材料的方式模拟实际岩层条件,采用物理模型试验方式模拟复杂厚层状围岩的变形规律;夏彬伟等^[11-14]通过在均质相似材料中添加结构弱面或软弱夹层制作层理围岩物理模型,对层理围岩的变形破坏规律进行了研究;余永强等^[15]制作了泥岩、砂岩和石灰岩 3 种岩石相似材料的层状复合材料,并通过添加云母粉的方式改变层间黏结强度,分析了层间黏结强度对层状岩石破坏机制的影响;代树红等^[16]采用石膏模拟岩层分界面,对层状岩石裂隙扩展进行了研究;Tien 等^[4,6]对交互层状岩石相似材料进行了单轴和三轴试验,对其变形破坏机制进行了深入探讨;邓荣贵等^[3]在石膏样中制作人工节理模拟层状岩石的结构特征,通过三轴试验研究了节理密度对试样变形破坏机制的影响;姜德义等^[17]将石英砂层夹入盐层中模拟盐岩。上述方法均适用于具有一定层厚的层状或层理岩石相似材料的制作,但片理岩石片理面分布密集且无明显的物质分异面,无明显的层厚。虽然二者在力学上同属于横观各向同性体,但其变形破坏特性、破坏机制、力学特性的演化规律与层状岩石是否相同,尚无充分试验结果说明^[8,18]。

由于目前层状相似材料难以模拟片理岩石结构特征,无法充分体现其物理力学特性。且目前尚未见专门模拟片理岩石结构和构造特征的相似材料。为此,通过研究取自丹巴二级水电站的石英云母片岩的宏观细观结构特征,发明了一种制作片理岩石相似材料的装置和方法,制作了一种与片理岩石结构特征相似的相似材料,为此,通过单轴和三轴试验对相似材料的力学行为、破坏特征进行了分析,验证所制作片理岩石相似材料装置的可靠性、方法的可行性及材料本身的相似性。

1 石英云母片岩的宏观细观结构特征

1.1 石英云母片岩的矿物成分

本研究所用岩样来自丹巴水电站厂房 CPD1 地

应力钻孔 ZK23-1 岩芯,所得岩芯具有明显的非均质性。选择片理面倾角接近、单轴抗压强度具有明显区别的石英云母片岩试样进行 XRD 矿物成分分析,鉴定结果如表 1 所示。由表 1 可知,石英云母片岩的主要矿物成分有片状矿物黑云母与白云母和粒状或短柱状矿物钠长石、石英和铁铝榴石等。对比分析试样粒状矿物与片状矿物体积分数,可以发现不同试样片状矿物和粒状或短柱状矿物的体积分数具有较大的差别。

表 1 XRD 矿物成分分析结果
Tab. 1 Mineral component analysis results of XRD

编号	矿物成分及体积分数/%				
	黑云母	白云母	钠长石	石英	铁铝榴石
D-01	51.99	26.58	13.56	5.43	2.44
D-02	17.28	2.03	26.61	44.40	9.67
D-03	45.87	26.11	3.22	21.08	3.72

1.2 石英云母片岩的宏观结构特征

如图 1 所示,层状岩石存在明显的贯通性结构弱面,且结构弱面平行排列,具有明显层厚,而石英云母片岩石英和云母相互夹杂分布,且并没有明显的物质分异面,也没有传统意义上的层厚,宏观的物质分异面并不连续,两者在宏观结构特征上具有明显的区别。

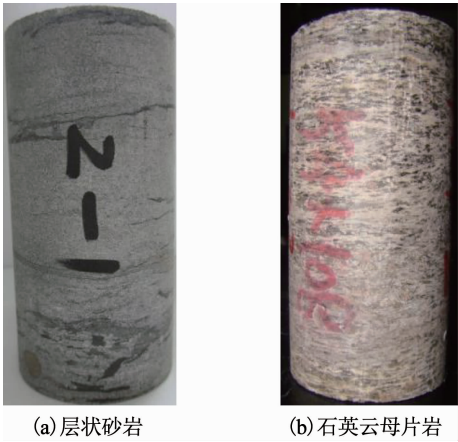


图 1 层状砂岩与石英云母片岩宏观结构

Fig. 1 Macrostructure of leastone and quartz-mica schist

1.3 石英云母片岩的细观结构特征

采用 SEM 电镜和偏光显微镜对石英云母片岩的构造和结构特征进行了分析,观察方向分别为垂直片理面和平行片理面,如图 2 所示。通过 SEM 电镜扫描和偏光显微镜鉴定结果可以看出,石英云母片岩结构为鳞片状变晶结构,片状构造,片状矿物的走向整体呈与矿物排布方向一致,成相互平行定向排列,存在极少量的片状矿物走向与整体走向相交的情况,片状矿物和粒状矿物交替夹杂分布。云母片

和石英的颗粒粒径相差较大,矿物的自形程度较低,且黑云母和白云母均含有极完全解理,这表明片理面为结构弱面,其定向排列可导致其力学性质呈现横观各向同性特征^[1-3,17-18]。

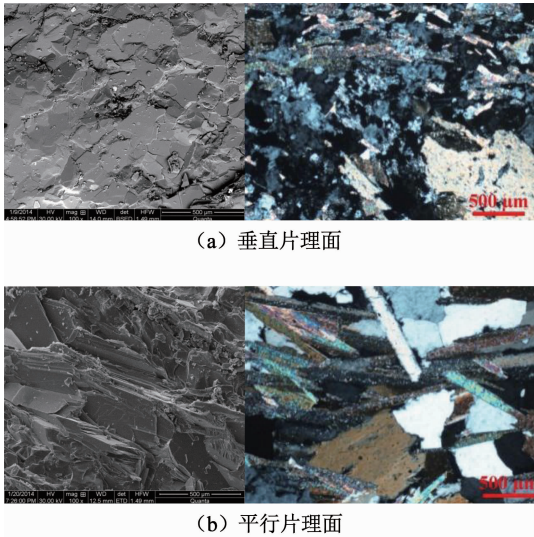


图 2 石英云母片岩细观结构
Fig. 2 Results of SEM and POM

2 石英云母片岩的变形破坏特征

为研究石英云母片岩变形破坏机制的影响因素,分别采用 RMT-150C 电液伺服刚性试验机和 MTS815.03 型压力试验机对石英云母片岩进行单轴压缩试验和常规三轴试验. 单轴压缩试样的片理面倾角为 40°,编号分别为 D-01 ~ D-03,三轴试样的编号分别为 Z/S/N-01 ~ Z/S/N-03,其片理面倾角分别为 0°(Z)、75°(S)和 90°(N). 片理面倾角 θ 的定义如图 3 所示.



图 3 片理面倾角 θ 的定义
Fig. 3 Definition of schistosity plane dip θ

2.1 片理面密度对石英云母片岩变形破坏机制的影响

对 D-01 ~ D-03 进行单轴压缩试验,试样的片理

面倾角均为 40°左右,试样的应力应变曲线如图 4 所示. 可以看出,D-01 和 D-03 呈现出应变软化的特征,D-02 的峰后应力均迅速跌落,发生了脆性破坏. 在片理面倾角为 40°的情况下,石英云母片岩的单轴抗压强度、弹性模量与其片状矿物体积分数的关系如图 5 所示. 可以看出,随着片状矿物体积分数的增加,石英云母片岩的单轴抗压强度和弹性模量逐渐降低. 这表明石英云母片岩矿物成分体积分数的变化会对其强度和弹性模量造成明显的影响,这是导致天然石英云母片岩力学性质离散性较大的重要原因.

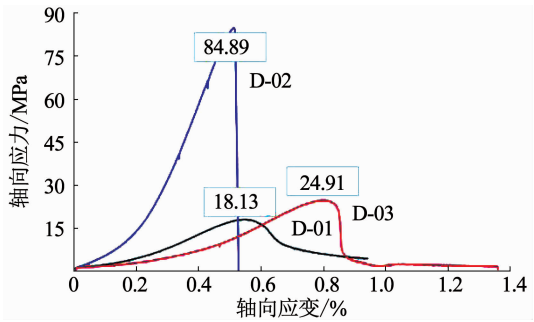


图 4 石英云母片岩单轴压缩试验应力应变曲线

Fig. 4 Stress-stain curves of quartz-mica schist uniaxial compression tests

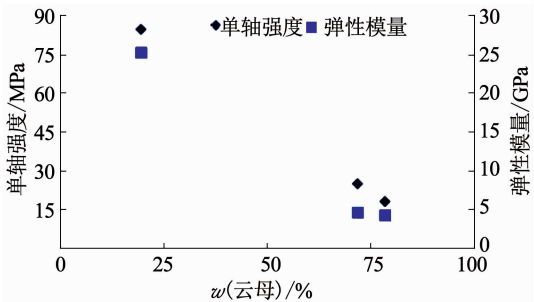


图 5 单轴抗压强度与云母体积分数关系

Fig. 5 Relationship between uniaxial strength and mica component

如图 6 所示,D-01 和 D-03 均发生了近似平行片理面的剪切破坏;D-02 的宏观破坏面与代表性片理面近似正交,且破坏时首先产生了一系列沿加载向发育的张拉破裂,随着荷载的增加,这些裂纹开展聚集并形成了宏观的剪切破坏面. 这表明在片理面倾角相同的情况下,随着片理面密度的减小及粒状矿物体积分数的增加,石英云母片岩的破坏形式受片理面的影响减弱.

2.2 石英云母片岩的宏观破坏特征

随着片理面倾角的变化,试样的破坏形式也会发生明显改变. Nasser 等^[19]的试验结果表明,片理岩石的破坏模式与片理面倾角和围压相关. 对试样 Z/S/N-01 ~ Z/S/N-03 开展了常规三轴试验,围压分

别为 5、10 和 20 MPa。图 7 为试样宏观破坏后的照片及破裂位置表面行迹的素描。可以看出,Z-01 ~ Z-03 试样的片理面倾角为 0°,均产生贯穿片理面的剪切破坏面;S-01 ~ S-03 试样的片理面倾角为 75°,倾角较陡,剪切破坏面贯穿片理面,且部分破坏位置追踪片理面发育;N-01 ~ N-03 试样的片理面倾角为 90°,剪切破坏面斜穿试样,破坏面倾角较陡。由图 7 可知,片理岩石破坏与层状岩石存在一定差别,即在片理倾角为 0°和 75°时较为接近,但片理岩石不发生阶梯状贯穿层理的破坏,其破坏面更加连续;在片理倾角为 90°时,试样以宏观斜向发育的剪切破坏为主,局部出现张拉破坏,而非层状岩石的层面拉开、岩板弯折鼓胀破坏。

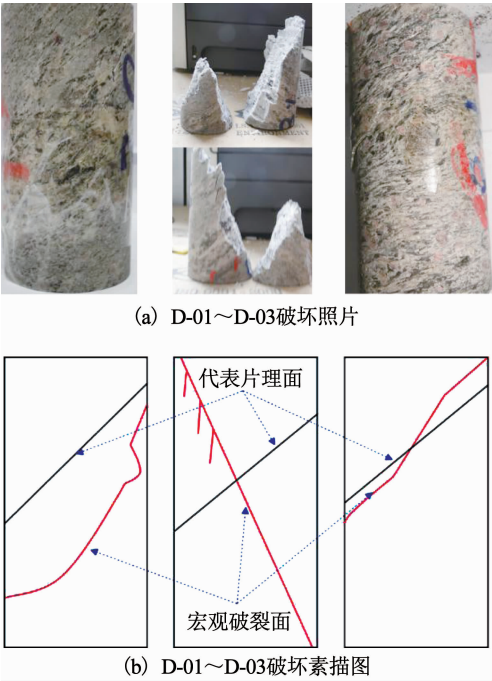


图 6 石英云母片岩单轴压缩破坏模式

Fig. 6 Uniaxial compression failure modes of quartz-mica schist

2.3 石英云母片岩的细观破坏特征

通过岩石破坏面细观特征的观察,可对其破坏机制进行分析和判断^[20]。由图 6,7 可知,石英云母片岩的破坏主要为贯穿或追踪片理面的剪切破坏及张拉破坏为主,因此,选取 D-01、S-02 和 S-03 3 个具有代表性试样的破坏断面进行电镜扫描,电镜扫描图片如图 8 所示。

图 8(a) 显示,D-01 试样的断口形貌为双滑移花样和条纹花样,这表明扫描位置的破坏方式主要为贯穿片理面的剪切破坏;图 8(b) 显示,S-02 试样的左侧断口形貌呈现平坦面花样,右侧断口形貌呈现切晶花样,这表明扫描位置包含了沿片理面的剪切破坏和贯穿片理面的剪切破坏两种破坏模式;图 8(c) 显示,S-03 试样的左侧断口形貌呈现平坦面

花样,表明该位置的破坏模式为沿片理面的剪切破坏,右侧断口形貌红色区域内呈现蛇形滑动花样,蓝色区域内呈现晶界断裂花样,这表明该位置同时存在贯穿片理面的剪切破坏和拉伸破坏两种破坏模式。对比图 8(a)、(b) 和 (c),可以发现片理面倾角较小时,试样的剪切破坏方式为贯穿片理面破坏,片理面倾角较大时,试样的剪切破坏方式主要为沿片理面破坏,垂直倾角下,局部发生张拉破坏表明片理面倾角的变化对试样的破坏机制产生了明显影响。

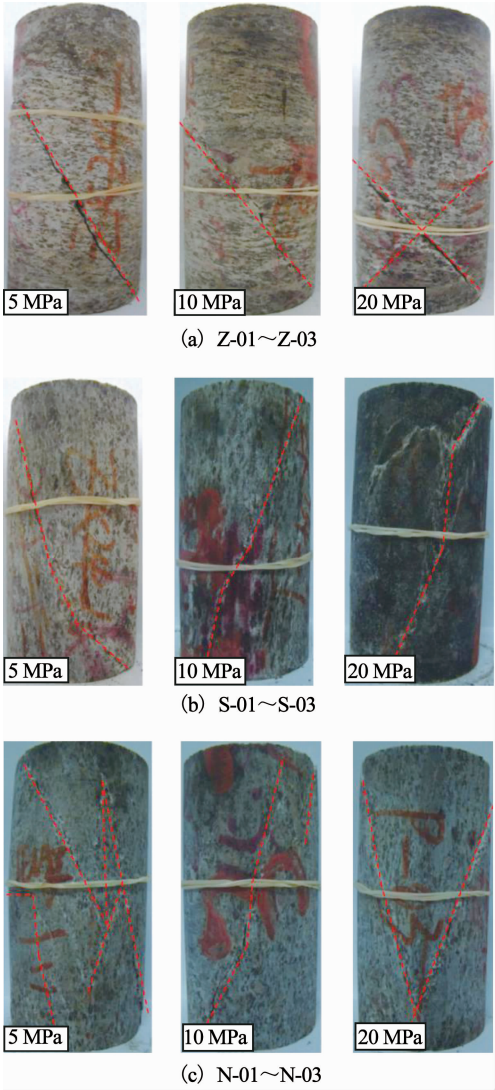


图 7 石英云母片岩常规三轴破坏模式

Fig. 7 Triaxial compression failure modes of quartz-mica schist

3 片理岩石相似材料制作

片理岩石的结构和构造特征是影响其变形破坏机制的主要因素,因此,相似材料需要在结构和构造上与原岩相似才能保证其变形破坏机制的相似性,基于此,制作并设计了相应的制作装置及方法,用于制作片理岩石相似材料。

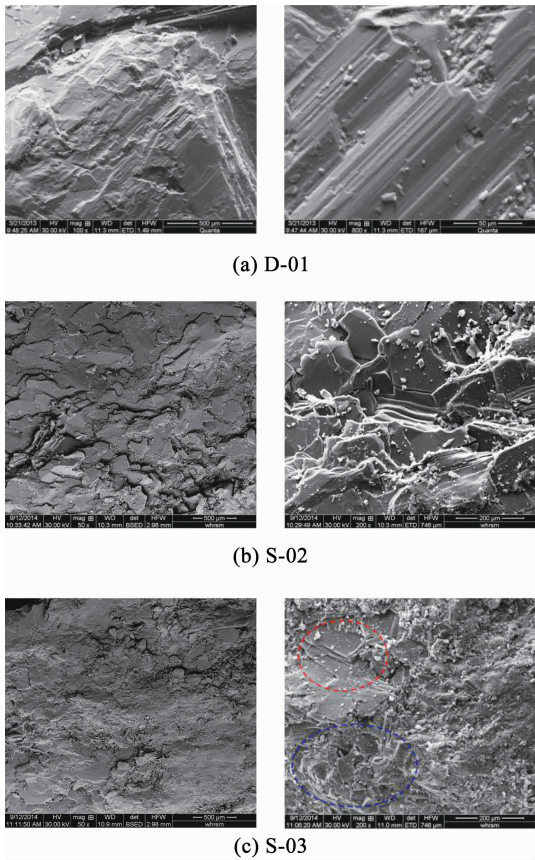


图 8 破坏断面电镜扫描照片

Fig. 8 SEM results of fracture surface

3.1 片理岩石相似材料制作装置

片理岩石相似材料制作最大的难度是整个试样中云母片的定向排列并均匀分布,为保证试样的整体性,还要求试样的连续浇筑,因此,水泥和云母片的混合物应具有良好的流动性.大量试验发现,试样在浇筑过程中浇筑厚度、速度、下料均匀性等均会影响云母片的排列.因此,片理岩石相似材料的制作技术要求非常高.本文研发了一种制作片理岩石相似材料的装置,装置成品如图 9 所示.装置主要是由模具和下料装置组成,其中关键技术在于下料装置的设计,下料装置的结构如图 10 所示.下料装置由齿轮支架、齿轮轨道、料斗、出料口动力同步轮、出料口转轮、动力齿轮、支架传动同步轮和滑动支架等部件组成,各部件编号为 1~8 顺序排列,通过齿轮连接固定形成整体.料斗由上部的漏斗槽和下部的下料筒组成,漏斗槽呈倒梯形,下料筒呈顶部开口的 Ω 状,出料口转轮位于下料筒内,如图 11 所示.

为了实现云母片的定向排列,就要使云母片在下料前形成定向排列的趋势,在下料之后通过刮板使云母片定向排列,且平铺在模具内的材料量要与材料下料量相同以防止材料堆积.因此,叶轮内外直径的间距小于云母片的粒径,各齿轮和同步轮的参数需要根据材料参数进行确定.下料装置的主要参

数计算如下

$$\begin{cases} \pi BH = \frac{2\pi - n\beta}{2\pi} \pi A \cdot (\frac{D^2}{4} - \frac{C^2}{4}), \\ \frac{D}{2} - \frac{C}{2} \leq F, \\ H \leq \frac{F}{2}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 为支架传动同步轮与出料口动力同步轮的齿数比, B 为动力齿轮的分度圆直径, C 为料斗的下部圆环内径, D 为出料口叶轮转轴的直径, F 为选取片状材料的粒径, H 为每层下料的厚度, β 为出料口叶轮的圆心角度, n 为出料口叶轮扇叶的数量.

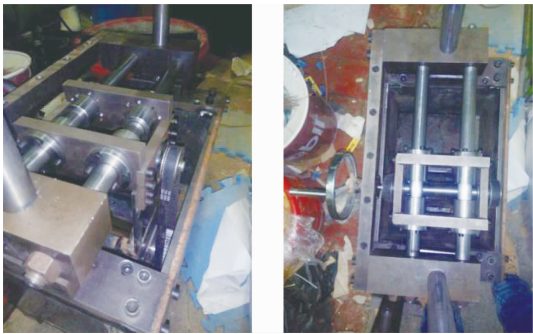


图 9 相似材料制作装置

Fig. 9 Production device of similar materials

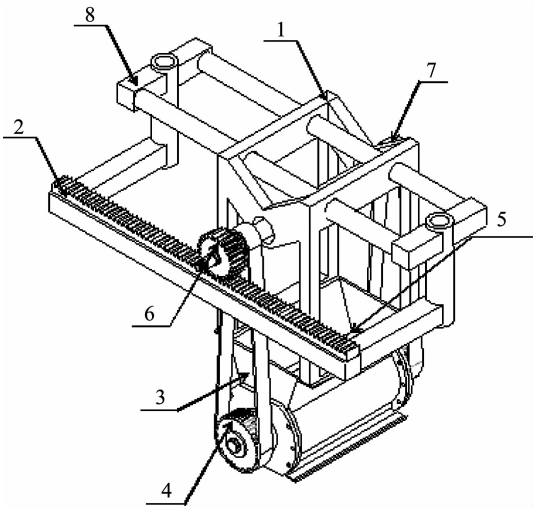


图 10 下料装置结构示意图

Fig. 10 Structure diagram of discharge device

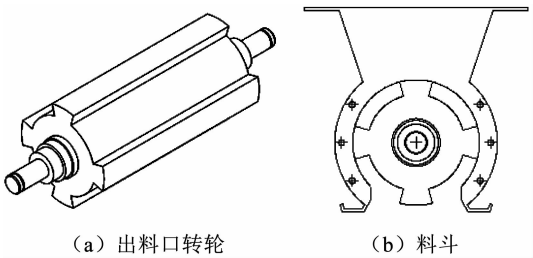


图 11 出料口示意

Fig. 11 Sketch of exit part

3.2 片理岩石相似材料制作工艺

经过前期的多次试验,制作片理岩石相似材料采用标号 32.5 的普通硅酸盐水泥作为胶凝材料,选取厚度为 0.3~0.5 mm、粒径 10 mm 左右的天然云母岩片作为集料, m (硅酸盐水泥): m (云母片): m (水)=6:3:4,材料制作过程示意如图 12 所示.

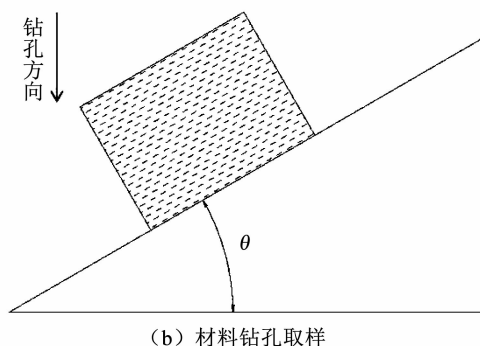
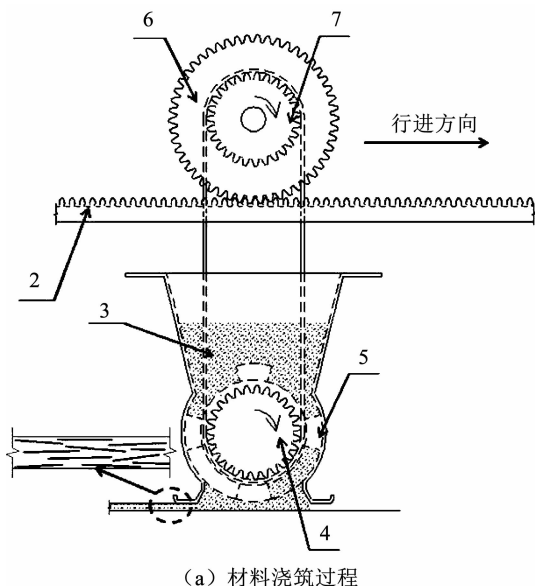


图 12 相似材料制作过程示意

Fig. 12 Similar materials production process

制作步骤如下:

1) 取水泥 12 kg, 云母片 6 kg, 将水泥与云母片搅拌均匀, 然后边搅拌边加入 8 kg 的水, 将混合材料搅拌均匀.

2) 将混合材料装入下料器内, 转动摇柄水平推动下料装置, 使混合材料进入长方体模具内, 完成一层下料后, 上调下料器 5 mm, 重复之前的步骤, 直至将模具填满, 将模具放在振动台将材料内的气泡震出. 混合材料的逐层浇筑且层厚小于云母片半径保证了云母片能够混合均匀且总体呈水平排列的趋势分布. 云母片分布示意如图 12(a) 所示, 对比图 2, 单个云母片的倾角虽然难以准确控制以保持严格的水平分布, 但角度偏差在可接受范围内.

3) 试样终凝后 10 h 将试样脱模, 试样采取自然

养护的方法养护 28 d 后实施钻孔取样, 钻孔取样方式如图 12(b) 所示.

3.3 片理岩石相似材料结构特征

图 13 为制作成的片理岩石相似材料, 硅酸盐水泥起到了胶结的作用, 与原岩粒状矿物的作用相近, 云母片则起到了细密且平行分布的片理面的作用, 与原岩片状矿物的作用相近. 对比图 13 和图 1, 2 可知, 片理岩石相似材料具有石英云母片岩片理面平行、细密且交替分布的特征, 两者具有相似的结构和构造特征.

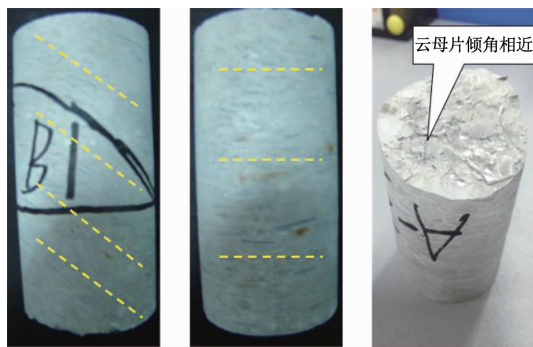


图 13 片理岩石相似材料

Fig. 13 Similar materials

4 片理岩石相似材料力学试验

根据相似原理的要求, 相似材料需要保证其力学性质的稳定性^[7]. 本次试验的目的是研究片理岩石相似材料的变形破坏机制并验证其力学性质的稳定性. 单轴和三轴试验所用试样的片理面倾角为 0°, 45°, 60° 和 90°, 单轴试验标号为 DZ、DF、DS 和 DN, 三轴试验试样标号为 SZ、SF、SS 和 SN.

4.1 片理岩石相似材料破坏特征

图 14, 15 为片理岩石相似材料在单轴压缩和 0.5 MPa 围压常规三轴试验条件下的破坏照片. 从左至右, 片理面倾角分别为 0°, 45°, 60° 和 90°.

相似材料单轴压缩试验的破坏特征如图 14 所示, 片理面倾角为 0° 时试样的破坏主要为贯穿片理面的剪切破坏, 破裂面的倾角为 30°; 当片理面倾角为 45° 和 60° 时试样的破坏主要为沿片理面的剪切破坏, 其中片理面倾角为 45° 时产生了台阶状拉裂纹, 这表明云母片与水泥形成的片理面对试样的破坏形式占主导地位, 片理面倾角的变化对单轴压缩试验中试样局部裂纹的扩展产生了影响; 当片理面倾角为 90° 时试样的破坏主要为宏观贯穿试样的斜向破坏, 局部可见沿片理面的张拉破坏.

相似材料常规三轴试验的破坏特征如图 15 所示, 片理面倾角为 0° 时试样的破坏主要产生了两条相交的宏观裂纹, 左侧宏观裂纹的倾角为 60° 左右,

右侧宏观裂纹的倾角为 45°左右,裂纹贯穿片理面,并且在左侧裂纹上段产生了连续的台阶状裂纹,台阶状裂纹上端与云母片垂直,下端接近与云母片平行;当片理面倾角为 45°和 60°时试样的破坏主要为沿片理面的剪切破坏;当片理面倾角为 90°时试样在垂直云母片的方向发生了侧向鼓胀变形,且产生了贯穿云母片的宏观裂纹,试样左右两侧表面产生了少量的竖直微裂纹。

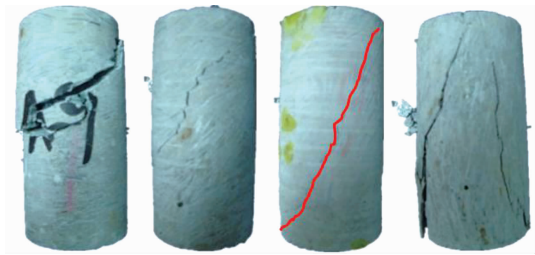


图 14 相似材料单轴试验破坏特征

Fig. 14 Uniaxial compression failure characteristics of similar materials



图 15 相似材料三轴试验破坏特征

Fig. 15 Uniaxial compression failure characteristics of similar materials

表 2 片理岩石相似材料抗压强度

Tab. 2 Compressive strength of the similar material

角度/(°)	单轴强度/MPa				标准差	三轴强度/MPa				标准差
	试验值		平均值			试验值		平均值		
0	16.27	—	—	16.27	—	17.70	—	17.70	—	
45	7.97	8.46	6.85	7.76	0.674	8.69	8.27	8.48	0.210	
60	8.27	8.50	8.18	8.32	0.135	9.45	8.43	8.94	0.510	
90	13.08	—	—	13.08	—	14.29	23.82	19.06	4.765	

在试验条件确定的情况下,试样抗压强度的离散主要是由材料的不均质性和取样的角度误差造成的.由表 2 可知,片理面倾角为 45°和 60°的试样单轴强度和三轴强度的标准差远小于平均值,说明片理岩石相似材料强度参数的波动范围较小,而片理面倾角为 90°的试样三轴强度的标准差较大.根据层状弱面体的屈服条件和破坏条件^[22]及 Duvau 等^[23]针对片岩的试验结果和理论分析结果,当片理面倾角大于某一倾角且小于等于 90°时,随着片理面倾角的增加,岩石的抗压强度明显增加.因此,片理岩石相似材料取样角度的误差是造成片理面倾角

4.2 片理岩石相似材料应力应变曲线分析

如图 16,17 所示,单轴条件下试样的峰后应力迅速跌落,三轴条件试样的残余强度较大,且均呈现出抗压强度随着片理面倾角的增加先减小后增加的重要特征.

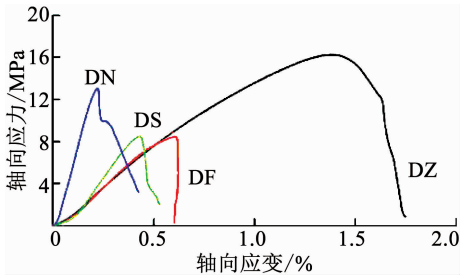


图 16 单轴压缩应力应变曲线

Fig. 16 Stress-stain curves of uniaxial compression tests

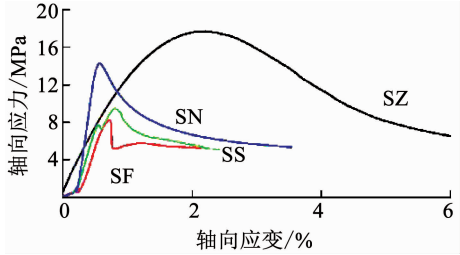


图 17 常规三轴应力应变曲线

Fig. 17 Stress-stain curves of triaxial compression tests

4.3 片理岩石相似材料强度规律

片理岩石相似材料在不同片理面倾角下的单轴和三轴抗压强度如表 2 所示.

为 90°试样三轴抗压强度出现明显差异的主要原因.

图 18 为片理面倾角与抗压强度的关系.可以看出,随着片理面倾角的增加,试样的抗压强度先减小后增加,这与层状弱面体的理论分析结果相符^[22].片理面倾角为 0°试样的单轴抗压强度高于 90°的试样,在三轴情况下则相反,王如宾等^[24]在对变质凝灰岩的研究中得出过类似的试验结果.结合本次试验试样的破坏模式,这是由于在单轴条件下,片理面倾角为 90°试样的破坏受沿片理面劈裂破坏的影响,在三轴条件下,试样的破坏则转变为贯穿云母片

的剪切破坏,破坏机制的变化导致了试样强度规律的变化。

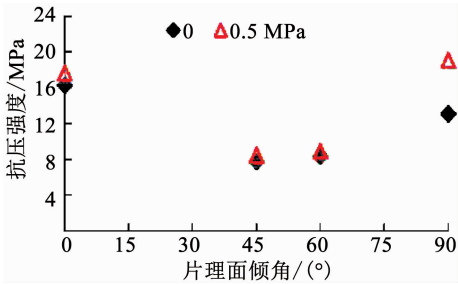


图 18 片理面倾角与抗压强度关系

Fig. 18 Relationship between schistosity plane dip and compressive strength

4.4 片理岩石相似材料弹性模量规律分析

根据 McCabe 等^[1]关于横观各向同性介质弹性参数的理论和试验结果,在静力作用下,与水平方向

呈 θ 角的弹性模量 E_θ 计算如下:

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_2} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta. \quad (2)$$

式中: E_1 E_1 为垂直横观各向同性面的弹性模量, E_2 为平行横观各向同性面的弹性模量, G_{12} 为垂直横观各向同性面的剪切模量, ν_{12} 为垂直横观各向同性面的泊松比。

G_{12} 根据经验公式计算, 即

$$G_{12} = \frac{E_1 E_2}{(1 + 2\nu_{12}) E_1 + E_2}. \quad (3)$$

弹性模量的计算采用单轴压缩试验数据, 弹性模量试验值与理论值如表 3 所示. 可以看出, 45° 样和 60° 样弹性模量的标准差均远小于试验值, 这表明片理岩石相似材料试样的离散度较小, 弹性模量的波动范围较小。

表 3 片理岩石相似材料弹性模量

Tab. 3 Elastic modulus of the similar material

角度/(°)	泊松比 ν	弹性模量/GPa				标准差	弹模理论值/GPa
		试验值		平均值			
0	0.11	1.20	—	—	—	—	1.20
15	—	—	—	—	—	—	1.25
30	—	—	—	—	—	—	1.40
45	—	1.54	2.16	1.67	1.79	0.267	1.69
60	—	2.20	2.95	2.23	2.46	0.347	2.13
75	—	—	—	—	—	—	2.62
90	0.24	2.86	—	—	—	—	2.86

图 19 可知,随着试样片理面倾角的增加,片理岩石相似材料的弹性模量随之增大,对比弹性模量的试验值和计算值,发现弹性模量的计算值和试验值基本相同,这表明片理岩石相似材料试样可很好地表现这类材料的弹性特性。

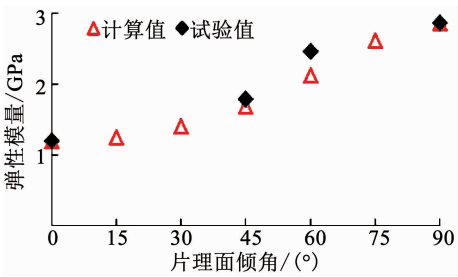


图 19 片理面倾角与弹性模量关系

Fig. 19 Relationship between schistosity plane dip and elastic modulus

5 结 论

1) 对石英云母片岩矿物成分及宏细观结构特征的研究结果表明,在片理岩石中,片理面为定向平

行排列的结构弱面,云母和石英的相互夹杂分布导致石英云母片岩没有明显的物质分异面和传统意义的层厚。

2) 在片理面倾角相同的情况下,片状矿物的体积分数与石英云母片岩的单轴强度和弹性模量呈负相关关系,且对石英云母片岩的变形破坏机制有明显的影响. 通过石英云母片岩的应力应变曲线和宏细观破坏特征,对石英云母片岩的变形破坏机制进行了分析。

3) 设计并制造了一种制作片理岩石相似材料的装置,选用合适的材料及配比,制作了一种宏细观结构特征与片理岩石相似的相似材料。

4) 对不同片理面倾角的片理岩石相似材料的变形破坏机制进行了分析,结果表明,该相似材料具有明显的横观各向同性特征,围压对其破坏机制具有明显的影响,其破坏机制随片理面倾角的变化规律与现有的研究结果相符. 采用设计的装置及制作工艺制作的片理岩石相似材料的物理力学特性与天然岩石相似且力学性质稳定,可以用于片理岩石力

学特性的研究.

5) 本文仅仅是针对原岩结构和构造特征制作了其相似材料, 通过结合原岩力学参数制作相似材料并对其变形破坏机制进行深入的研究是下一步的工作重点.

参考文献

[1] MCCABE W M, KOERNER R M. High pressure shear strength investigation of an anisotropic mica schist rock [C]. //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 1975, 12(8): 219

[2] NASSERI M H B, RAO K S, RAMAMURTHY T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 3. DOI:10.1016/S1365-1609(02)00103-X

[3] 邓荣贵, 付小敏. 层状岩体力学特性模拟实验研究[J]. 实验力学, 2012, 26(6): 721

DENG Ronggui, FU Xiaomin. On the simulative experimental study of mechanical properties of stratified rock mass [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 26(6): 721

[4] TIEN Y M, KUO M C. A failure criterion for transversely isotropic rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3): 399. DOI:10.1016/S1365-1609(1)00007-7

[5] 张桂民, 李银平, 施锡林, 等. 一种交互层状岩体模型材料制备方法 & 初步试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊): 284

ZHANG Guimin, LI Yinping, SHI Xilin, et al. Research of a model material preparation method for alternate layered rock mass and preliminary experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Suppl 2): 284. DOI:10.16285/j.rsm.2011.s2.023

[6] TIEN Y M, KUO M C, JUANG C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(8): 1163. DOI:10.1016/j.ijrmms.2006.03.011

[7] 左保成, 陈从新, 刘才华, 等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1805

ZUO Baocheng, CHEN Congxin, LIU Caihua, et al. Research on similar material of slope simulation experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1805

[8] 谷德振. 岩体工程地质力学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1979

[9] 郭从军, 南存全, 王东. 近距离煤层覆岩移动相似材料模拟 [J]. 金属矿山, 2015 (1): 10

GUO Congjun, NAN Cunquan, WANG Dong. Similar material simulation experiment on overburden rock movement of close-distance coal seams [J]. Metal Mine, 2015 (1): 10

[10] 贺桂成, 李玉兰, 张志军. 缓倾斜层状石膏矿开采沉陷相似模拟 [J]. 有色金属: 矿山部分, 2015, 67(4): 13

HE Guicheng, LI Yulan, ZHANG Zhijun. Similar simulation of mining subsidence of gently inclined bedded gypsum mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2015, 67(4): 13

[11] 夏彬伟, 胡科, 卢义玉, 等. 深埋隧道层状岩体破坏过程特征模型试验 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 107

XIA Binwei, HU Ke, LU Yiyu, et al. Model test for characteristics of failure process of layered rock mass in deep buried tunnel [J]. Zhongguo Gonglu Xuebao (China Journal of Highway and Transport), 2012, 25(1): 107. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.01.017

[12] 李丹, 夏彬伟, 陈浩, 等. 缓倾角层理各向异性岩体隧道稳定

性的物理模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1933

LI Dan, XIA Binwei, CHEN Hao, et al. Research on stability of tunnel in anisotropic layered rock mass with low inclination angle bedding by model test [J]. Rock Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1933. DOI:10.16285/j.rsm.2009.07.013

[13] 张绪涛, 张强勇, 向文, 等. 深部层状节理岩体分区破裂模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2247

ZHANG Xutao, ZHANG Qiangyong, XIANG Wen. Model test study of zonal disintegration in deep layered jointed rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2247. DOI:10.16285/j.rsm.2014.08.011

[14] 于广明, 谢和和, 张玉卓, 等. 节理岩体采动沉陷实验及损伤力学分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 16

YU Guangming, XIE Hehe, ZHANG Yuzhuo, et al. Test study of excavation subsidence in jointed rockmass and analysis on damage dynamics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 1998, 17(1): 16

[15] 余永强, 胡明研, 杨小林, 等. 层状复合岩体相似模拟的试验研究 [J]. 金属矿山, 2009 (1): 21

YU Yongqiang, HU Mingyan, YANG Xiaolin, et al. Similarity simulation of bedded composite rock [J]. Metal Mine, 2009 (1): 21

[16] 代树红, 王召, 潘一山, 等. 水力压裂作用下裂隙在层状岩体内的扩展特征 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2370

DAI Shuhong, WANG Zhao, PAN Yishan, et al. Study on characteristics of crack propagation in stratified rock under the force of hydraulic fracturing [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2370

[17] 姜德义, 张军伟, 屈丹安, 等. 一种含夹层盐岩模型材料的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(增刊 1): 76

JIANG Deyi, ZHANG Junwei, QU Danan, et al. Experimental study on a similar material of rock salt with interlayer [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 76. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2013.s1.004

[18] 蔡美峰. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002

[19] NASSERIM H, RAO K S, RAMAMURTHY T. Failure mechanism in schistose rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 219

[20] 李先伟, 兰勇瑞, 邹俊兴. 岩石断口分析 [J]. 中国矿业学院学报, 1983, 12(1): 15

LI Xianwei, LAN Yongrui, ZOU Junxing. A study of rock fractures [C] // 5th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics, 1983, 12(1): 15

[21] ZHANG C, ZHOU H, FENG X, et al. A new interpretation for the polyaxial strength effect of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47: 496. DOI:10.1016/j.ijrmms.2010.01.003

[22] 郑颖人, 孔亮. 岩土塑形力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010

[23] DUVEAU G, SHAO J F. A modified single plane of weakness theory [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(6): 807. DOI:10.1016/S0148-9062(98)00013-8

[24] 王如宾, 张玉, 张治亮. 坝基各向异性岩石力学特性试验研究 [J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2010, 32(2): 5

WANG Rubin, ZHANG Yu, ZHANG Zhiliang. Experimental investigation on mechanical properties of anisotropic rocks in dam foundation [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2010, 32(2): 5