

不同倾角软硬组合岩体破裂演化过程分析

赵娜, 孟利新, 缪海宾, 张怡斌, 王来贵

Experimental analysis of failure process in soft-hard combined rock masses at different inclination angles

ZHAO Na, MENG Lixin, MIAO Haibin, ZHANG Yibin, and WANG Laigui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单轴压缩条件下闪长岩的声发射特征

\${suggestArticle.titleEn}

吴述宽, 徐金明, 涂齐亮 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(6): 126-134

强震区隧道洞口软硬岩交接段围岩注浆抗震措施效果分析

Research on aseismic effect of grouting measures for tunnel portal structure at interface between soft and hard rock in high-intensity earthquake zone

王泽军, 陈铁林, 崔光耀, 马军辉, 张玉 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 96-102

非贯通非共面凝灰岩节理岩体各向异性及其能量特征分析

\${suggestArticle.titleEn}

宋洋, 任萌, 张维东, 王贺平, 李征 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(1): 126-132

锚固的贯通节理岩体剪切破坏特性分析

Shear failure mode of anchored rock mass with through joints

宋洋, 张峰源, 李永启, 杜炎齐, 王伟颐 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 133-140

堰塞坝堆积演化过程及开发利用研究进展

Research progress on the evolution and utilization of the barrier dam accumulations

王环玲, 屈晓, 徐卫亚, 王如宾, 刘士奇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 84-94

加锚贯通节理岩体宏细观剪切破坏特性

Macroscopic and microscopic shear failure characteristics of anchored penetrating jointed rock mass

宋洋, 赵玉兵 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 95-101



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203036

赵娜, 孟利新, 缪海宾, 等. 不同倾角软-硬组合岩体破裂演化过程分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 58-67.

ZHAO Na, MENG Lixin, MIAO Haibin, et al. Experimental analysis of failure process in soft-hard combined rock masses at different inclination angles[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 58-67.

不同倾角软-硬组合岩体破裂演化过程分析

赵娜^{1,2}, 孟利新¹, 缪海宾², 张怡斌¹, 王来贵¹

(1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司
煤矿安全科学技术国家重点实验室, 辽宁沈抚示范区 113122)

摘要:为探究软岩倾角对组合岩体破裂演化过程的影响, 论文通过对不同软岩倾角组合岩体进行单轴压缩试验, 采用数字散斑和声发射方法作为观测手段, 探究含不同软岩倾角组合岩体的破裂演化过程, 分析组合岩体力学性能随角度的变化规律, 得出含不同倾角软硬组合岩体的破裂模式。结果表明: (1) 软硬组合岩体破坏是岩体内部发生损伤, 在软岩周围开始出现裂纹, 并沿着软岩层及周围扩展、贯通破裂的动态演化过程。(2) 组合岩体的变形破坏过程仍表现为原始裂隙压密、弹性变形、塑性变形及破坏四个阶段。(3) 随着软岩倾角的增大, 岩体的压密阶段逐渐增大, 弹性模量逐渐减小, 抗压强度越来越小; 当软岩倾角 $\theta=0^\circ$ 、 15° 时, 岩体破裂表现为软硬组合岩体组合破裂; 当软岩倾角 $\theta=30^\circ$ 、 45° 时, 岩体破裂主要发生在软岩区域, 岩体的破坏形式由贯穿软岩层剪切破坏转变为沿软岩层滑移剪切破坏。可见软岩层倾角越大, 岩体越容易发生失稳破坏。论文可为含软硬组合岩体工程的长期稳定性分析及复杂层状组合岩体的力学行为研究提供参考。

关键词: 软硬组合; 裂纹演化; 数字散斑; 声发射; 单轴压缩

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2023)04-0058-10

Experimental analysis of failure process in soft-hard combined rock masses at different inclination angles

ZHAO Na^{1,2}, MENG Lixin¹, MIAO Haibin², ZHANG Yibin¹, WANG Laigui¹

(1. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology China Coal Technology & Engineering Group Shenyang Research Institute, Shenyang Demonstration Zone, Liaoning 113122, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the inclination angle of soft rocks on the evolution process of composite rock mass rupture, this paper conducted uniaxial compression experiments on composite rock masses with different inclination angles of soft rock. Digital speckle and acoustic emission methods were used as observation tools to explore the combined effects of different soft rock dip angles. The fracture evolution process of the rock mass was analyzed, and the change in mechanical properties of the composite rock mass with angle was studied. The fracture mode of the soft and hard composite rock mass with different inclination angles was obtained. The results show that the deformation and failure of the composite rock mass is a dynamic evolution process in which damage occurs inside the rock mass, with cracks appearing around the soft

收稿日期: 2022-03-24; 修订日期: 2022-05-30

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1503101); 辽宁省重点科技创新基地联合开放基金项目(2020-KF-13-06); 辽宁省教育厅资助项目(LJ2020JCL013)

第一作者: 赵娜(1979-), 女, 河北衡水人, 博士, 副教授, 主要从事岩体力学及岩层控制方面研究。E-mail: zhaona24@163.com

rock, and extend along and around the soft rock layer, eventually penetrating through the fracture. The deformation and failure process of the combined rock mass is manifested in four stages: original fissure compaction, elastic deformation, plastic deformation and failure. With an increase of the inclination angle of soft rocks, the compaction stage of the rock mass gradually increased, and the elastic modulus gradually decreased. When the inclination angle of soft rock is $\theta=0^\circ$ or 15° , the rock mass rupture appears as a combination of soft and hard rock mass failure. When the inclination angle of soft rock is $\theta=30^\circ$ or 45° , the rock mass failure mainly occurs in the soft rock area, and the form of rock mass changes from shear failure penetrating the soft rock layer to sliding shear failure along the soft rock layer. The greater the inclination angle of the soft rock layer, the more likely the rock mass is to undergo unstable failure. This study provides a reference for the long-term stability analysis of rock mass engineering containing soft and hard composites and the mechanical behavior of complex layered composite rock mass.

Keywords: soft-hard combination; crack evolution; digital speckle; acoustic emission; uniaxial compression

0 引言

层状结构是岩体工程中最普遍的类型^[1]。据调查,自然界中具有层状结构的沉积岩占陆地面积的2/3^[2]。层状岩体一般分布有一组占绝对优势的结构面(如层理等),且优势结构面大多属于物质分异面^[3]。根据层状岩体强度的大小,可分为软岩和硬岩。一般将岩石抗压强度小于15 MPa的岩体称为软岩,大于20 MPa则为硬岩^[4]。软-硬相间层状组合岩体是边坡、隧道等岩石工程中常见的岩体类型之一,如图1为矿山边坡软硬层状岩体。这类岩体力学性质复杂,既有强度各向异性的特征也有层状岩体变形横观各向同性的特征。徐伟等^[5]以彝良县红层地区地质灾害为研究对象对层状边坡结构破坏过程进行了分析,得到了不同方向层状边坡下的破裂模式,软岩的存在会降低岩体的力学性能,在软岩弱面上产生剪切破坏,影响岩体工程的稳定性。



图1 矿山边坡软硬层状岩体

Fig. 1 Soft-hard layered combined rock mass at the mining slope

关于软-硬组合岩体,当软岩厚度较小时,通常将软岩看做弱面或者夹层。Jaeger^[6]基于单一弱面岩体提出了横观各向同性准则,并进一步将Mohr-Coulomb准则中的内黏结力看作层面倾角的函数,将内摩擦力作为常量,得到修正之后的层状岩体抗剪强度公式;李剑

光等^[7-8]通过弹性力学平面轴对称理论,推导了含水平软弱夹层及倾斜软弱夹层岩体试件的艾瑞应力函数;Saroglou等^[9]和Singh等^[10]在前人基础上将修正之后的Mohr-Coulomb准则和Hoek-Brown破坏准则应用于层状岩体;康钦容^[11]通过弹性小变形理论推导了复合层状岩体的变形及弹性模量,提出层状岩体存在水平层理,使得岩体的强度以及整体弹性模量降低,并且增大了试件破坏时岩层的整体变形量。张顶立等^[12]通过分析层状岩体结构和力学特性,建立了含夹层岩体组合系统力学模型,分析了夹层岩体破坏及失稳机理。鲜学福^[13]在分层各向同性假设下,通过取变弹模单元,推导了层间有粘结力和无粘结力时,水平和倾斜层状岩体的界面应力,并分析了层状岩体的力学强度。在试验研究方面,张永泽等^[14]、衡帅等^[15]选取石柱县龙马溪组页岩,通过单、三轴压缩试验分析了页岩的力学特性,强度特征和破裂模式的各向异性,证明了其破坏机制的各向异性;王聪聪等^[16]选用层理明显的板岩进行单轴压缩试验,分析岩石材料在各向异性条件下岩体力学参数变化规律。另外,关于含夹层岩体的力学特性、强度及变形特征之间的关系,丁多文等^[17]等通过对炭质页岩夹层的力学特性进行了室外和室内试验研究,建立起软弱夹层的应力应变关系方程。Tien等^[18-19]研究了将岩体看作横观各向同性体时,夹层对岩体整体强度和弹性模量的影响,并分别对岩体的两种破坏模式提出了相应的破坏准则。张立等^[20]研究了冻融循环条件下含软弱夹层围岩的力学性质及破坏特征,得到了冻融情况下岩体的破坏特征。刘伟等^[21]通过单轴压缩试验对类层状岩体标准试样试验研究,得出了试样的强度和弹性模量随层理间距的变化规律,分析了试样的破坏形态,最后通过理论计算对试验结果进行了验证;赵永红等^[22]通过试验研究了含软弱夹层的大理岩材料变形破坏过程,但该研究

未考虑夹层倾角对岩石的影响。

以上研究多考虑含夹层岩体的力学特性,但关于软-硬组合岩体软岩夹层倾角对组合岩体变形破裂演化过程的研究较少。因此,论文选用砂岩夹泥岩试件进行单轴压缩试验,利用数字散斑和声发射设备观测单轴压缩条件下,不同倾角软-硬组合岩体的破裂演化过程,为复杂层状组合岩体的力学行为研究提供参考。

1 单轴压缩组合岩体破裂演化试验

1.1 试件制备及方案

根据实际深部工程的地质条件和岩层分布情况,试验选取红砂岩作为硬岩,选取灰泥岩作为软岩,将两种岩石如图 2 进行粘接加工, h 为泥岩厚度, θ 为泥岩层与水平方向夹角。



图 2 不同倾角软硬组合岩体模型图

Fig. 2 Model diagram of soft and hard combined rock masses with different inclination angles

红砂岩是由各种砂粒胶结而成的沉积岩,颗粒直径一般在 0.08~2 mm,主要由硅、钙、黏土和氧化铁组成,呈褐红色,强度较高,约为 40 MPa 左右。泥岩是由弱固结土经过挤压、脱水、重结晶及胶结作用形成的强固结岩石,遇水易膨胀,抗压强度显著降低,约为 15 MPa 左右,主要由蒙脱石、高岭石等其他黏土矿物组成。两类岩石的力学性质差异性明显,这就为深入研究含软硬组合岩体破坏中的力学行为创造先决条件。云石胶主要由不饱和树脂和环氧树脂两种材料混合而成,由于云石胶在其硬度、韧性、快速固化和耐腐蚀方面有显著性优势,因此得到许多建筑行业 and 石材行业的广泛认可。其适用于各种石材间的粘结和石材表面的修补。研究表明,云石胶的粘结强度为 7~12 MPa,粘结压剪力可以达到 10~35 kN,冲击韧性为 2.3 kJ/m²。因此,本次试验选用云石胶作为粘结剂来黏结基岩制备软硬组合岩体。保持基岩表面干净整洁,将其依次放入模

具中,在交界面处均匀涂抹云石胶,粘结过程中必须保证岩石的垂直度满足试验规范要求,压实 5~10 min,将其置于干燥环境中凝固,防止长期暴露在空气中,影响岩体的力学性质,采用保鲜膜包裹凝固好的试件,试件如图 3 所示。

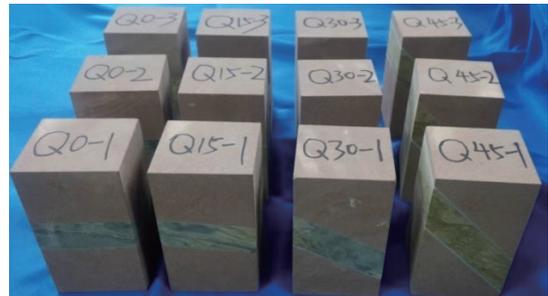


图 3 软硬组合岩体试件

Fig. 3 Soft-hard combined rock mass specimen

考虑到实际软硬夹层工程中软岩低厚度、低倾角的地质条件和岩层分布情况,又基于岩石试件本身大小,因此选取厚度 h 为 20 mm 的较高软岩层厚度岩体,从而达到对含较薄软岩层软硬组合岩体提供理论参考。对不同倾角软硬组合岩体试样进行单轴压缩试验,岩样尺寸均为 50 mm×50 mm×100 mm 的立方体试样,每组 3 个,共四组,试验方案如表 1。

表 1 试验方案

Table 1 Summary of test plan

组名	软岩角度/(°)	软岩厚度/mm	数量
Q0	0	20	3
Q15	15	20	3
Q30	30	20	3
Q45	45	20	3

1.2 试验系统

试验系统包括试验加载系统、图像采集分析系统及声发射检测系统三部分组成,如图 4 所示。

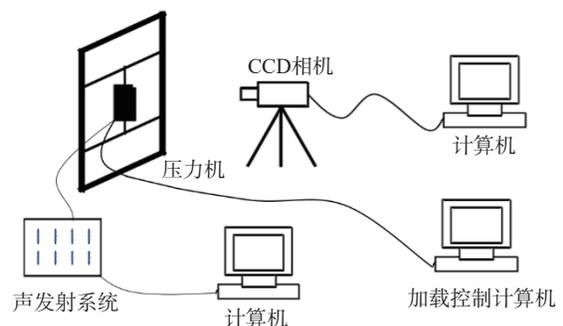


图 4 试验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental system

试验加载系统采用 YAW-2000 微机控制电液伺服岩石(混凝土)压力试验机,采用位移控制加载,加载速率为 0.005 mm/s。

声发射监测系统采用 PCI-2 型 8 通道声发射测试分析系统,该系统主要由计算机、高频传感器及前置放大器等设备组成。该系统的监测阈值为 36 dB,谐振频率 140 kHz,撞击定义时间为 50 μ s,采样时间间隔为 0.1 s,主要监测单轴压缩条件下软硬组合岩体变形破坏过程中的事件数 A 、能量、振铃计数及幅值等参数。试验过程中为了构建软硬组合岩体的三维声发射空间分布,选定散斑面为试件的正面,采用 5 个声发射探头分布于试样左右两侧及后侧,探头位置如图 5 所示,其中声发射探头 1 和 2 位于试样后侧中线位置,分别距离顶、底部的距离为 30 mm,传感器 3 和 4 分别位于斜边三分之一位置,传感器 5 位于斜边中点位置,采用凡士林作为声发射探头耦合剂,增强探头和试样之间的耦合效果,为了保证在试验过程中收集的数据真实有效,在正式采集数据前对声发射监测系统进行了断铅试验。

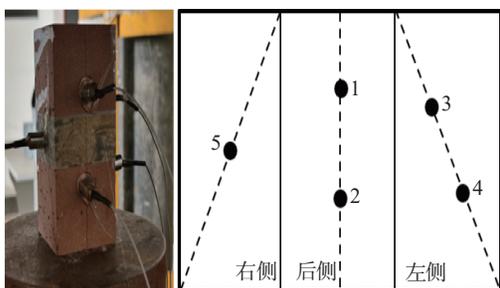


图 5 电荷传感器分布图

Fig. 5 Distribution of charge sensors along specimen surface

图像采集分析系统主要包括软件系统和硬件系统。硬件系统主要由白光源、计算机、CCD 相机组成。白光源主要照射在试样表面,保证图像的灰度不变;试验中用到的 CCD(Basler)相机设计的图像采集速度 15 帧/s,图像分辨率 4 872 像素 \times 3 248 像素,拍摄范围 50 mm \times 80 mm,主要用于记录加载过程中试样表面散斑场图像。试样表面预制散斑及拍摄范围如图 6 所示。软件系统是对试验过程中采集到的散斑图像进行处理分析,获得试样表面应变场、位移场等相关信息。

2 不同倾角组合岩体变形破坏特性分析

图 7 为试验得到的四组不同倾角组合岩体单轴压缩过程中应力-应变关系曲线,由图中可以看出不同倾角组合岩体的应力-应变曲线均经过压密阶段(I)、弹性

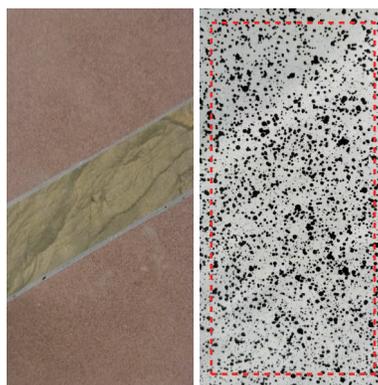


图 6 喷漆后的试样散斑场($\theta=30^\circ$, $h=20$ mm)

Fig. 6 Speckle field of specimen after painting ($\theta=30^\circ$, $h=20$ mm)

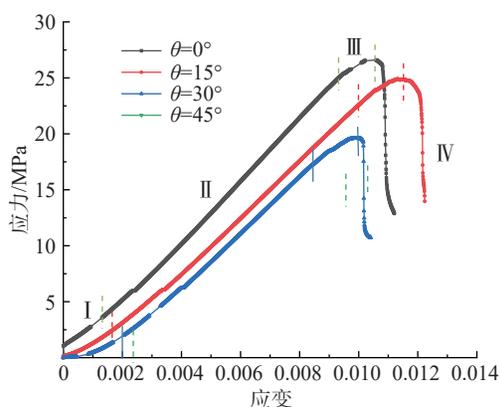


图 7 不同倾角组合岩体的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of combined rock masses with different inclination angles

阶段(II)、塑性变形阶段(III)及破坏阶段(IV),但含不同倾角组合岩体在应力-应变曲线各个阶段内表现出不同的特征。

(1)在压密阶段(I),随着泥岩倾角的增大,泥岩所占比例变大,岩体的压密阶段最大应变逐渐增大,但是最大应变所对应的应力值逐渐减小。

(2)在弹性阶段(II),组合岩体发生弹性变形,应力-应变曲线近似为直线,斜率即弹性模量随着角度的增大逐渐减小。

(3)在塑性变形阶段(III),组合岩体发生塑性变形,应力的峰值即抗压强度随着角度的增大越来越小,岩体达到破坏所需的应力也越小。当 $\theta=0^\circ$ 时,抗压强度为 26.59 MPa;当 $\theta=15^\circ$ 时,抗压强度为 24.83 MPa;当 $\theta=30^\circ$ 时,抗压强度为 19.62 MPa;当 $\theta=45^\circ$ 时,抗压强度为 17.02 MPa。

(4)在破坏阶段(IV),组合岩体变形趋势基本相同。

根据试验结果,统计不同倾角组合岩体在单轴压缩荷载全过程的物理力学参数见表 2。

表 2 不同倾角组合岩体单轴压缩试验结果

Table 2 Experimental results of uniaxial compression of rock masses with different inclination angles of the weak layers

标号	密度/(g·cm ⁻³)		弹性模量/GPa		峰值应变/%		抗压强度/MPa	
	单个试样	均值	单个试样	均值	单个试样	均值	单个试样	均值
Q0-1	2.42		2.96		1.64		29.50	
Q0-2	2.41	2.40	2.99	2.94	1.53	1.46	26.50	27.53
Q0-3	2.36		2.86		1.21		26.59	
Q15-1	2.38		2.86		1.54		25.07	
Q15-2	2.41	2.38	3.00	2.80	1.69	1.51	26.95	25.62
Q15-3	2.35		2.55		1.30		24.83	
Q30-1	2.42		2.91		1.57		18.75	
Q30-2	2.38	2.39	2.84	2.76	1.26	1.32	19.89	19.42
Q30-3	2.37		2.54		1.12		19.62	
Q45-1	2.28		2.40		0.97		16.99	
Q45-2	2.27	2.28	2.39	2.39	1.05	1.00	16.07	16.75
Q45-3	2.28		2.37		0.99		17.02	

将不同角度的组合岩体每组各参数取平均值,绘制弹性模量、抗压强度随倾角变化曲线见图 8。

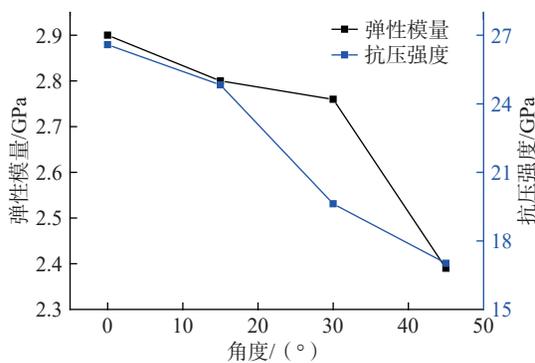


图 8 不同倾角组合岩体弹性模量、抗压强度变化曲线

Fig. 8 Variation curves of elastic modulus and compressive strength of rock mass with different inclination angles

由图 8 可以看出,当 $\theta=0^\circ$ 时,平均弹性模量值为 2.94 GPa,平均抗压强度值为 27.53 MPa;当 $\theta=15^\circ$ 时,平均弹性模量值为 2.8 GPa,平均抗压强度值为 25.62 MPa;当 $\theta=30^\circ$ 时,平均弹性模量值为 2.76 GPa,平均抗压强度值为 19.42 MPa;当 $\theta=45^\circ$ 时,平均弹性模量值为 2.39 GPa,平均抗压强度值为 16.75 MPa。组合岩体所含软岩倾角越大,软-硬组合岩体试件越容易发生破坏。随着软岩岩体倾角的增大,试件的弹性模量和抗压强度逐渐变小,且随着角度的增大,弹性模量和抗压强度减小的趋势越来越明显。也就是说,随着软岩倾角的增大,组合岩体抵抗变形破坏的能力急剧降低。

3 组合岩体单轴压缩破裂演化过程分析

岩石的破坏实际上是其内部裂隙起裂、扩展直至贯通破裂的动态演化过程。论文采用声发射与数字散斑相结合的方法,对软-硬组合岩体试样的破坏过程进行分析。鉴于文章篇幅,取泥岩倾角为 30° 的岩体试件进行分析。图 9 为岩样加载过程中应力、振铃计数、累计振铃计数随时间的变化关系曲线,黑色线代表应力,红色线代表振铃计数,蓝色线代表累计振铃计数。数字散斑对应组合岩体垂直方向应变演化云图见图 10,图 11 为组合岩体内部声发射破裂点示意图。

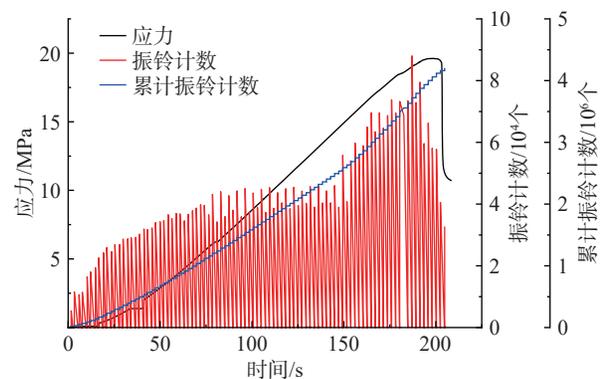


图 9 应力-累计振铃计数-时间关系曲线

Fig. 9 Stress-cumulative ringing count-time relationship curve

由图 9 可知,在荷载作用下,随着岩体应力应变曲线的变化,0~150 s 这一过程内,声发射振铃计数、累计振铃计数稳定增长,表明岩体内部损伤程度在

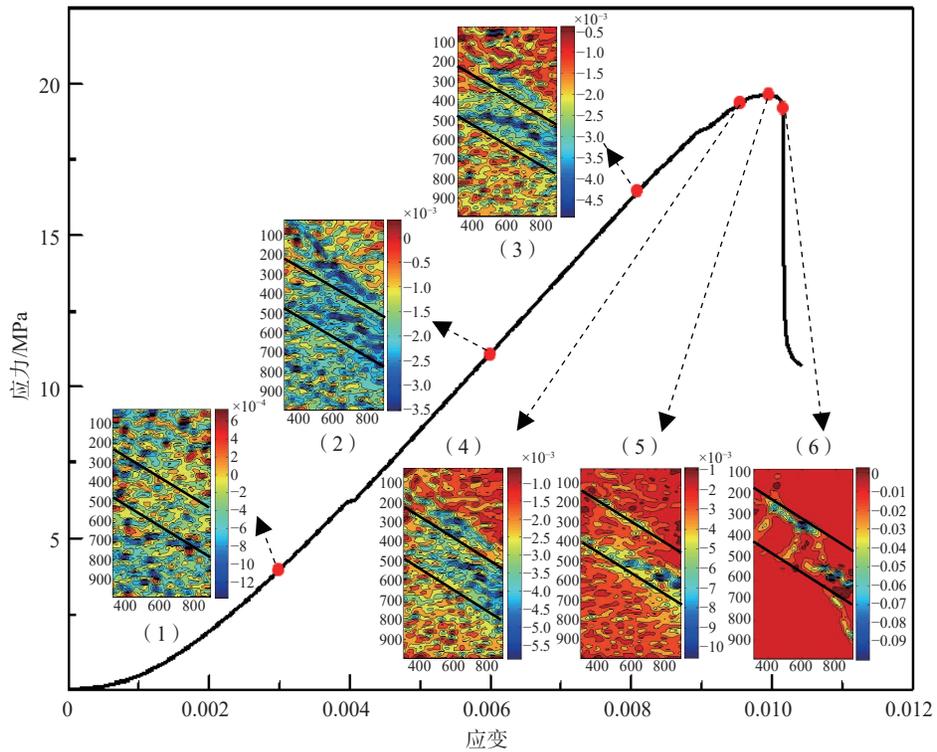


图 10 岩体表面垂直方向应变演化云图

Fig. 10 Cloud map of vertical strain evolution on rock mass surface

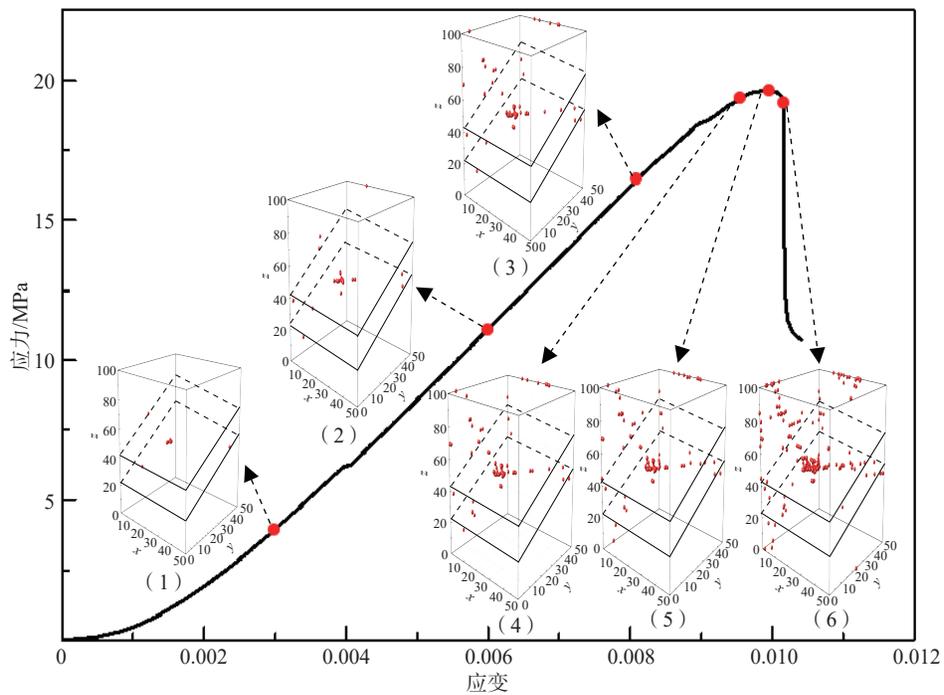


图 11 岩体内部三维破裂点标识图

Fig. 11 Three-dimensional distribution map of fracture points inside the rock mass

不断增加,由图 10(1)—(3)可知,岩体内部应力持续增大,软岩周围开始发生裂纹起裂,此外,图 11(1)—(3)中声发射红色点分布在软岩层的上下方,展现出

岩体裂纹起裂扩展的趋势。150 s 之后,岩体的应力应变曲线开始出现非线性状态,同时,声发射振铃计数、累计振铃计数增长速度变快,表明岩体开始加速

破坏,与此同时图 10(4)—(5)可明显观测到软岩区域及周围发生裂纹扩展,最终在软岩区域形成宏观破裂如图 10(6)所示。由图 11(4)—(6)可知,声发射红色点快速增长,岩体试件的声发射事件开始大面积分布在软岩区域周围,表面岩体内部在发生加速破坏。由此可见,软岩层的存在对岩体整体稳定性起到了减弱作用。

4 不同倾角组合岩体破裂模式

4.1 不同倾角组合岩体声发射信号演化规律

为更好反映含不同倾角组合岩体内部微破裂萌生、成核、扩展和贯通,利用声发射试件记录下不用倾角组合岩石破裂应力-累计振铃计数-时间关系曲线和不同倾角组合岩体三维破裂点标识示意图,如图 12、图 13 所示。从图中可以看出,声发射事件随着应力曲

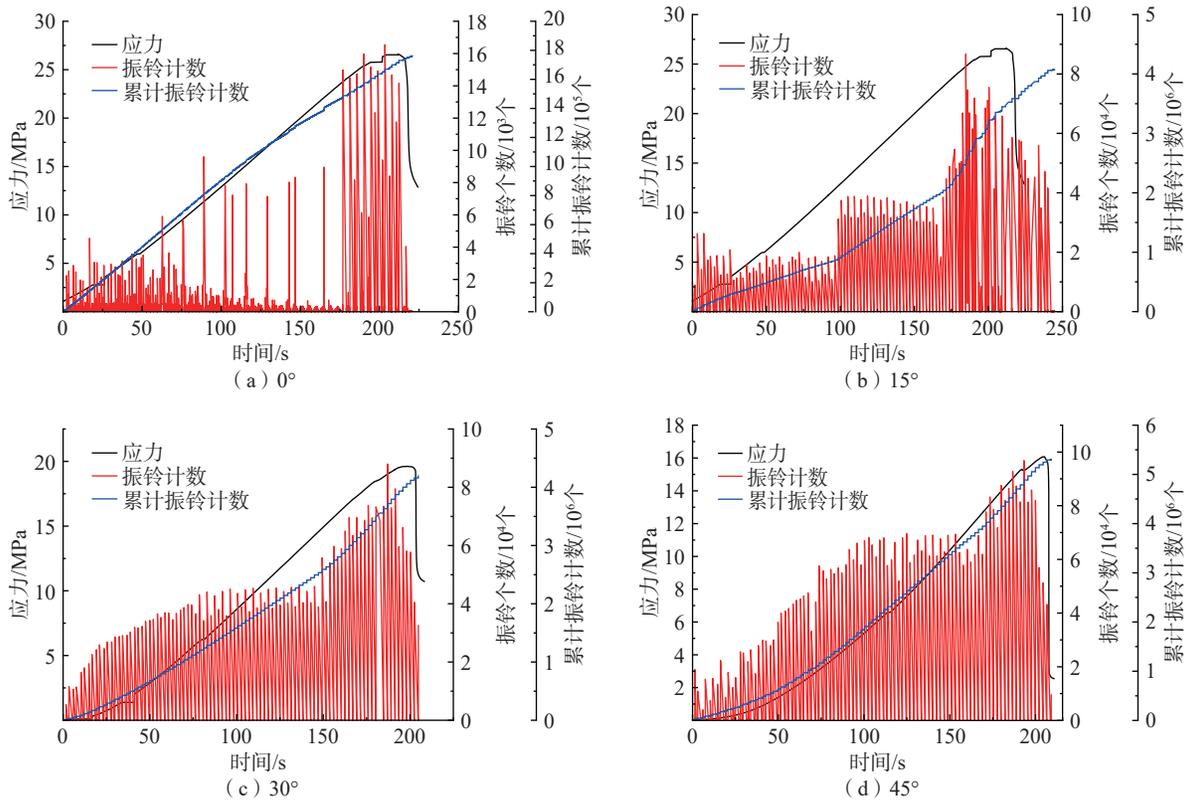


图 12 不同倾角组合岩体应力-累计振铃计数-时间关系曲线

Fig. 12 Stress-cumulative ringing count-time relationship curve with different inclination angles

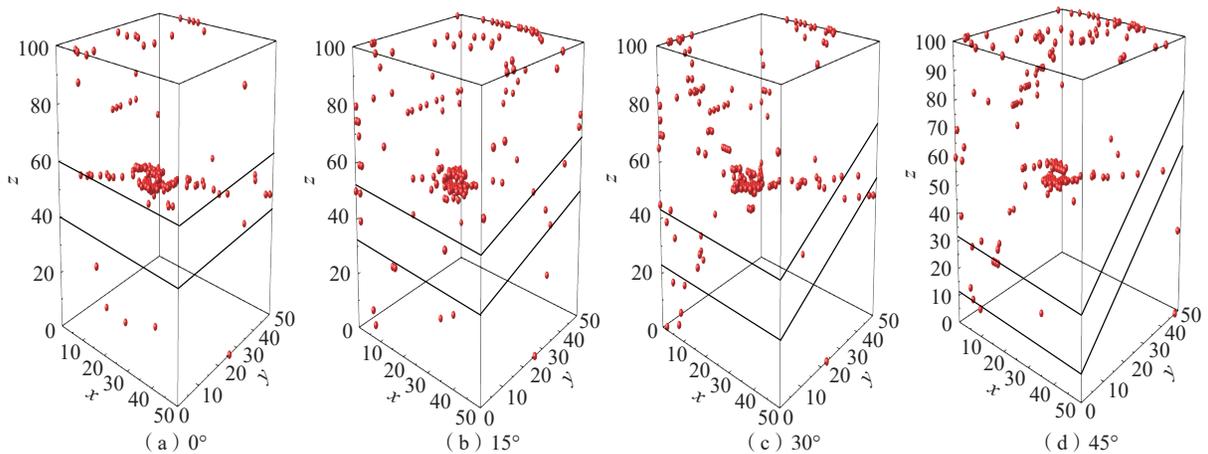


图 13 不同倾角组合岩体三维破裂点示意图

Fig. 13 Three-dimensional distribution map of fracture points inside the rock mass with different inclination angles

线的不同阶段发生相应变化,当岩体处于压密和弹性阶段,会有少量的声发射事件发生,当岩体处于塑性变形阶段,声发射事件有所减少,当岩体进入破坏阶段,声发射事件显著增加,岩石临近失稳破坏。随着软岩层角度的增加,可以很清楚地观测到声发射事件越来越多,遍布岩体周围的信号点也显著增多,声发射事件率突增代表了岩体内部损伤加大,裂纹不稳定扩展加剧,岩体即将发生失稳破坏或已经发生破坏。

4.2 不同倾角组合岩体数字散斑演化规律

试验结束后,将采集到的散斑图像用 DSCM 软件进行处理,选取不同软岩倾角(0°、15°、30°、45°)组合岩体,对图 6 选定的区域进行分析,得出水平方向和竖直方向破坏阶段应变演化如图 14、图 15 所示。

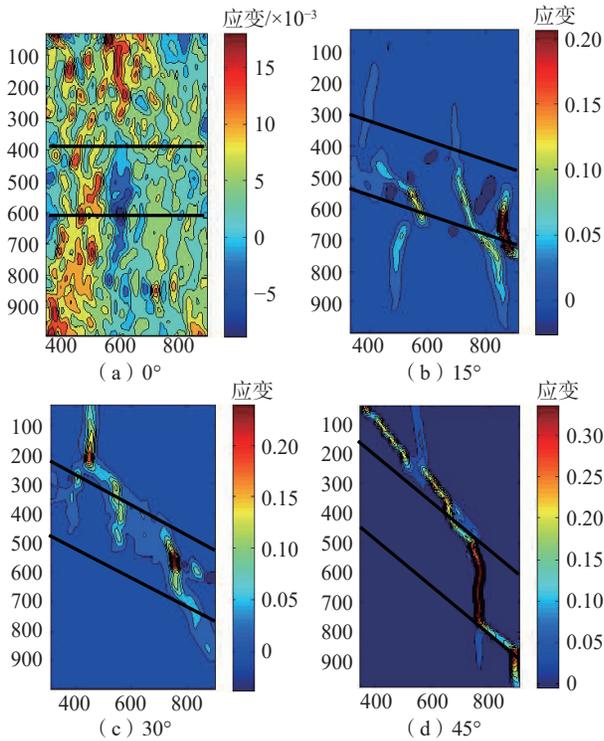


图 14 不同倾角组合岩体水平方向应变演化云图

Fig. 14 Cloud map of horizontal strain evolution on rock mass surface with different inclination angles

由图 14 水平方向应变演化云图可以看出,当 $\theta=0^\circ$ 时,应变最大值分布在岩体不同区域;当 $\theta=15^\circ$ 时,应变最大值集中在软岩区域右侧;当 $\theta=30^\circ$ 时,应变最大值分布在软岩区域右端及左上方硬岩区域附件;当 $\theta=45^\circ$ 时,岩体在软岩区域出现明显的应变带;可见,随着软岩倾角的增大,水平方向应变增大且应变最大值逐渐集中在软岩区域。由图 15 竖直方向应变演化云图可以看出,当 $\theta=0^\circ$ 时,应变最大值分布在岩体软岩区域;当

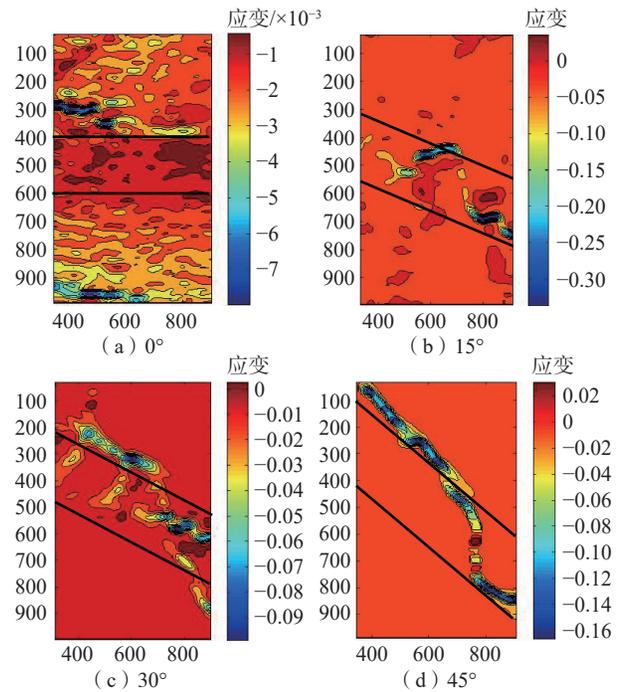


图 15 不同倾角组合岩体竖直方向应变演化云图

Fig. 15 Cloud map of vertical strain evolution on rock mass surface with different inclination angles

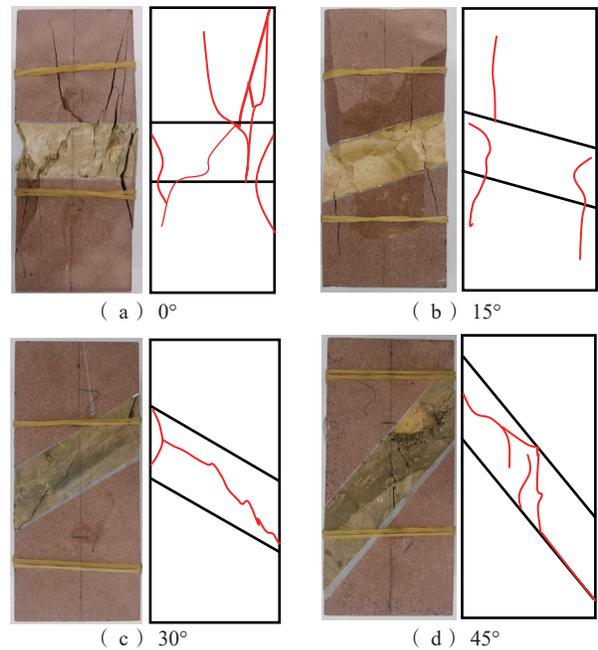


图 16 含不同倾角组合岩体单轴压缩破坏形态

Fig. 16 Uniaxial compression failure mode of combined rock mass with different inclination angles

$\theta=15^\circ$ 时,应变最大值集中在软岩层区域右下方;当 $\theta=30^\circ$ 时,应变最大值集中分布在软岩区域,形成小型应变集中带;当 $\theta=45^\circ$ 时,应变贯穿软岩区域出现明显的应变集中带。由此可见,随着软岩层倾角的不断增大,软硬

组合岩体应变越来越大,应变最大值逐步由整个组合岩体倾向软岩层区域。

4.3 不同倾角组合岩体破坏形态

图 16 为单轴压缩加载过程中不同倾角组合岩体破坏形态。

由不同倾角组合岩体破坏形态可以看出,岩体在受载荷压缩的过程中,裂纹起裂首先发生在软岩层及附近,并且向着轴向加载方向不断扩展,软岩层倾角越大,砂岩部分裂纹破裂越小,当软岩倾角 $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=15^\circ$ 时,岩体破裂表现为软硬组合岩体组合破裂,当软岩倾角 $\theta=30^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 时,岩体破裂主要发生在软岩区域,岩体的破坏形式由贯穿软岩层剪切破坏转变为沿软岩层滑移剪切破坏,与声发射系统和数字散斑观察下相一致,可见,不同倾角软硬组合岩体所含软岩层倾角越大,岩体的整体破坏性影响越大。

5 结论

通过岩石单轴压缩试验,分别采用数字散斑和声发射系统对软硬组合岩体变形破坏过程和岩体最终破坏形态进行采集,利用 DSCM 软件对试验过程的图像进行计算得出了数字散斑下岩石变形破坏全过程,利用声发射设备测出了岩体内部裂纹萌生、扩展和贯通破裂的演化过程。

(1)不同倾角组合岩体的应力-应变曲线仍符合压密、弹性、塑性变形及破坏四个阶段。随着软岩倾角的增大,岩体的压密阶段逐渐增大,弹性模量逐渐减小,应力峰值即抗压强度也越来越小。

(2)软硬组合岩体裂纹萌生和起裂均位于软岩层区域并围绕软岩层发生扩展、破裂和贯通。当软岩倾角 $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=15^\circ$ 时,岩体破裂表现为软硬组合岩体组合破裂,当软岩倾角 $\theta=30^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 时,岩体破裂主要发生在软岩区域,岩体的破坏形式由贯穿软岩层剪切破坏转变为沿软岩层滑移剪切破坏,可见软岩倾角越大,岩体越容易发生失稳破坏。

(3)论文选用软岩厚度较高的低倾角软硬组合岩体,探究随软岩倾角变化时岩体的破裂演化过程,为复杂层状组合岩体的力学行为研究提供参考。

参考文献(References):

- [1] 毛正君,毕银丽,李成,等.渭北石灰岩露天采区高陡边坡破坏模式及形态优化研究[J].西北地质,2021,54(4):211-226. [MAO Zhengjun, BI Yinli, LI Cheng, et al. Study on failure mode and shape optimization of high and steep
- slope of open-pit limestone mining area in Weibei [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(4): 211-226. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 姚闯闯,姚鑫,顾珍逵,等.基于InSAR识别的黄土高原活动性地质灾害发育规律分析[J].地质力学学报,2022,28(2):257-267. [YAO Chuangchuang, YAO Xin, GU Zhenkui, et al. Analysis on the development law of active geological hazards in the Loess Plateau based on InSAR identification [J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(2): 257-267. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李洪梁,高波,张佳佳,等.内外动力地质作用耦合的崩塌形成机理研究——以藏东昌都地区上三叠统石灰石矿山采场崩塌为例[J].地质力学学报,2022,28(6):995-1011. [LI Hongliang, GAO Bo, ZHANG Jiajia, et al. Mechanism of rockfall coupled with endogenic and exogenic geological processes: A case study in the upper Triassic limestone mines in the Qamdo area, eastern Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 995-1011. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王小明,李勇,李刚.中欧岩土工程勘察分级及岩土分类对比[J].长江科学院院报,2013,30(10):72-76. [WANG Xiaoming, LI Yong, LI Gang. Comparison of the grading of geotechnical investigation and the classification of rock and soil between Europe and China [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(10): 72-76. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 徐伟,冉涛,田凯.西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式——以云南彝良县为例[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(6):127-133. [XU Wei, RAN Tao, TIAN Kai. Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 127-133. (in Chinese with English abstract)]
- [6] JAEGER J C. Friction of rocks and stability of rock slopes [J]. Géotechnique, 1971, 21(2): 97-134.
- [7] 李剑光,王永岩.含水平弱夹层岩体界面应力及破坏形式[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(6):710-715. [LI Jianguang, WANG Yongyan. Analysis for failure modes and interfacial stress of rock mass with horizontal weak interlayer [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2015, 34(6): 710-715. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 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. [LI Jianguang. Study on strength and creep characteristics of composite rock mass with inclined weak interlayer [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2015. (in Chinese with

- English abstract)]
- [9] SAROGLU H, TSIAMBAOS G. 2008. A modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic intact rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45(2): 223 - 234.
- [10] SINGH M, SINGH B. Modified Mohr-Coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of jointed rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 51: 43 - 52.
- [11] 康钦容, 张卫中, 张电吉. 层状岩体破坏性质试验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(14): 273 - 276. [KANG Qinrong, ZHANG Weizhong, ZHANG Dianji. Experimental study on failure property of layered rock mass [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(14): 273 - 276. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张顶立, 王悦汉, 曲天智. 夹层对层状岩体稳定性的影响分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(2): 140 - 144. [ZHANG Dingli, WANG Yuehan, QU Tianzhi. Influence analysis of interband on stability of stratified rockmass [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(2): 140 - 144. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 鲜学福, 谭学术. 层状岩体破坏机理 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989. [XIAN Xuefu, TAN Xueshu. [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1989. (in Chinese)]
- [14] 张永泽, 刘俊新, 冒海军, 等. 单轴压缩下页岩力学特性的各向异性试验研究 [J]. *金属矿山*, 2015(12): 33 - 37. [ZHANG Yongze, LIU Junxin, MAO Haijun, et al. Anisotropic experimental study on mechanical properties of shale under uniaxial compression [J]. *Metal Mine*, 2015(12): 33 - 37. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 609 - 616. [HENG Shuai, YANG Chunhe, ZHANG Baoping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(3): 609 - 616. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王聪聪, 李江腾, 林杭, 等. 板岩单轴压缩各向异性力学特征 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(11): 3759 - 3764. [WANG Congcong, LI Jiangteng, LIN Hang, et al. Anisotropic mechanical characteristics of slate in uniaxial compression [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(11): 3759 - 3764. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 丁多文, 罗国煜. 链子崖危岩体软弱夹层的力学特性 [J]. *水文地质工程地质*, 1994, 21(6): 7 - 9. [DING Duowen, LUO Guoyu. Mechanical properties of weak interlayers in Lianziya dangerous rock mass [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1994, 21(6): 7 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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 - 412.
- [19] TIEN Y M, TSAO P F. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(6): 1001 - 1012.
- [20] 张立. 冻融循环条件下含软弱夹层隧道围岩力学性质及破坏特征 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 74 - 80. [ZHANG Li. On mechanical properties and failure characteristics of surrounding rock of tunnel with weak interlayer under freezing-thawing cycles [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 74 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 刘伟, 曾亚武, 夏磊, 等. 单轴压缩下层状岩体的各项异性研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(1): 145 - 149. [LIU Wei, ZENG Yawu, XIA Lei, et al. Anisotropy of layered rock mass under uniaxial compression [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(1): 145 - 149. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 赵永红, 杨振涛. 含软弱夹层岩石材料的损伤破坏过程 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(13): 2350 - 2356. [ZHAO Yonghong, YANG Zhentao. Research on fracturing around cemented slot in rock specimen [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(13): 2350 - 2356. (in Chinese with English abstract)]