

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.004

冲击作用下千枚岩动态力学及饱水软化特性分析*

徐锦兴¹, 李文¹, 朱盛², 刘艾静², 刘瑛琦², 吴立²

(1. 中交二航局(昆明)建设有限公司, 昆明 650000; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为研究冲击作用下层状千枚岩的动态力学特性及饱水状态对其岩石力学特性的影响, 制备了不同层理角度(0°、30°、60°、90°)和不同含水状态(干燥、饱水)的千枚岩试件, 再利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统开展动态冲击试验, 最后分析了不同层理角度和含水状态下试样的力学特性与能量耗散规律。结果表明: 千枚岩的变形破坏模式受到层理倾角和含水状态的共同作用, 试件动态力学参数值随层理倾角变化规律均为0° > 90° > 30° > 60°, 且饱水状态下试件动态力学参数均小于干燥试件; 试件破坏形式主要为0°倾角的压断破坏, 30°与60°沿层理面的剪切破坏和90°倾角的压杆失稳破坏, 且试件饱水状态破碎度更高; 千枚岩饱水状态不同倾角试件的耗能密度均大于干燥状态, 其中0°倾角试件耗能密度最高, 90°倾角试件的耗能密度最低。

关键词: 层状千枚岩; SHPB(霍普金森压杆实验); 动态加载; 饱水条件; 能量耗散

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0034-10

Dynamic Mechanical and Water Saturation Softening Characteristics of Phyllite under Impact Loading

XU Jin-xing¹, LI Wen¹, ZHU Sheng², LIU Ai-jing², LIU Ying-qi², WU Li²

(1. CCCC SHEC(Kunming) Construction Co., Ltd., Kunming 650000, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: To study the influence of saturation on dynamic mechanical behavior and energy absorption in layered phyllite, phyllite specimens with varying bedding angles (0°, 30°, 60°, 90°) and moisture conditions (dry versus saturated) were prepared, and then a dynamic impact test was carried out by using the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test system. Finally, the mechanical properties and energy absorption characteristics of the specimens under varying bedding angles and saturation levels were analyzed. The results show that the deformation and failure mode of phyllite are influenced by the combined effects of bedding dip angle and moisture conditions. The mechanical parameter variation follows the sequence 0° > 90° > 30° > 60° for bedding angles, with saturated specimens exhibiting lower values than dry specimens. Specimens predominantly exhibited crushing failure at 0° inclination, shear failure along bedding planes at 30° and 60°, and compressive bar instability at 90°, while showing higher degrees of fragmentation under saturated conditions. Experimental results demonstrate that saturated phyllite specimens exhibit higher energy dissipation density across all tested bedding angles compared to dry specimens, with maximum energy absorption oc-

收稿日期(Date of reception): 2025-04-24

网络首发日期(Published online): 2025-11-19

作者简介: 徐锦兴(1983-), 男, 云南宣威人, 学士、高级工程师, 主要从事隧道及地下工程方面的工作, (E-mail) 515729847@qq.com。

通信作者: 吴立(1963-), 男, 湖南株洲人, 博士、教授, 主要从事工程爆破方面的教学与研究工作, (E-mail) lwu@cug.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672260)

About the author: XU Jin-xing (1983-), male, born in Xuanwei city, Yunnan province, bachelor, senior engineer, mainly engaged in tunnel and underground engineering work, (E-mail) 515729847@qq.com.

Corresponding author: WU Li (1963-), male, born in Zhuzhou city, Hunan province, Ph. D, professor, mainly engaged in engineering blasting teaching and research work, (E-mail) lwu@cug.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (41672260)

curing at 0° inclination angle and minimum dissipation observed at 90° inclination angle.

Key words: layered phyllite; Split Hopkinson Pressure Bar; dynamic loading; saturated conditions; energy dissipation

千枚岩作为典型板状构造变质岩类,发育多组软弱结构面,呈现显著的力学属性各向异性特征。该岩体水理性质敏感,易发生水解软化现象,导致其工程稳定性显著降低^[1-4]。尤其值得注意的是,多组结构面形成的网状裂隙系统为孔隙水提供了优势运移通道,在饱和工况下,水力作用诱发岩体内部胶结结构的渐进性劣化,这种物理化学耦合效应会显著影响千枚岩的力学特性^[5-8]。

针对层状岩体复杂的力学特性大量学者对其展开了研究^[9-13],但主要集中在岩石的静力学研究方面。如王小良综合应用单轴与三轴压缩试验方法^[14],系统研究了不同层理取向下煤层试样的强度变形和破裂扩展特性。侯振坤基于层状岩体单轴压缩试验的相关成果给出随层理角度分布的龙马溪组页岩各向异性强度特征^[15]。邓华锋等基于声发射技术研究了层状岩体力学参数的计算方法^[16]。Kou等研究了温度和层理角度对层状片麻岩抗拉强度的作用机理^[17]。Shi等探究了层理角度在泥页岩断裂韧性与抗拉强度关系中的作用及各向异性程度^[18]。刘奇等揭示了酸的腐蚀作用对层状砂岩力学性质的影响^[19]。上述研究主要集中于准静态加载条件及不同环境条件下的层状岩体力学特性。但在爆破开挖、钻井等地下工程施工过程中,岩体主要受动荷载作用。

在岩石动力学研究方面,聚焦于不同岩性、层理结构及加载条件下的动态响应规律、能量演化特征与破坏机制。已有研究多通过试验研究、理论建模与数值模拟相结合的方法,揭示层状岩体动态力学行为的各向异性本质及其工程影响^[20,21]。如王健等针对层状盐岩与泥岩夹层的动态力学特性对比试验表明^[22],层理界面显著影响岩体的强度和变形能力,软硬夹层交界处易形成应力集中区,诱发渐进式破坏。杨仁树等通过 SHPB 试验发现^[23],层状复合岩体在冲击荷载下的动态强度随应变率增加呈非线性增长。在损伤机理方面,Zhang 等基于板岩冲击试验提出了考虑层理效应的损伤本构模型^[24],揭示了动态压缩下裂纹沿层理扩展的优先性;而李地元等通过动静组合加载试验发现^[25],含孔洞层状砂岩的能量耗散率与缺陷几何参数密切相关。Huang 等探究了恒定冲击能量下的热处理层状页岩压缩力学特性^[26]。

由上述研究成果可知,目前,学者们对层状岩体的静态、动态及蠕变等力学特性方面都有了一定的研究成果。但对于千枚岩此类具有片理结构且水理性极差的一类变质软岩的研究相对较少,研究其在饱水环境下的动态力学特性及能量耗散方面的研究是十分必要的。因此,采用分离式霍普金森压杆试验装置对干燥与饱和两种状态下的不同层理角度千枚岩试件进行冲击动力学试验,研究干燥与饱和状态层状千枚岩试件在同一加载气压下的动力学特性,并从能量角度,分析两种状态下不同层理角度试件能量耗散特征;最后总结了冲击荷载作用下饱水状态与层理角度耦合影响下千枚岩的动态破坏机制。

1 SHPB 试验方案

1.1 千枚岩试样

试验所取的千枚岩试样具有明显的层理性,其电镜图像如图 1 所示。为确保所得试样性能相近,试验所用的材料均取自于一块单一完整的千枚岩。将千枚岩加工成直径 50 mm、长度 25 mm 的圆柱体标准试样,对试样进行打磨抛光,使其端面粗糙度低于 0.02 mm。按层理面夹角分为 0°、30°、60°、90° 岩样,如图 2 所示。将岩样编为干燥组 A 与饱和组 B,每组中不同层理角度岩样各 3 个。

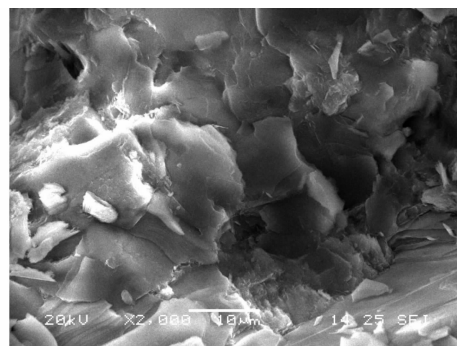


图 1 试样电镜图像

Fig. 1 Specimen electron microscope image

将两组试样全部放入烘干箱中烘干后称重,再将 B 组分别浸泡 10 d、20 d、30 d 和 40 d 后取出,擦干表面水分后称重,若试样重量不变,则认为其已饱和。

1.2 试验过程

试验采用 SHPB 系统,由氮气瓶及调压表组成动力系统,控制子弹输出动能。输入杆与输出杆直径 50 mm,试样与杆等径加载冲击,在离试样 1 m 处

的输入杆与输出杆上黏贴应变片,应变片连接超动态应变仪及示波器系统,如图3所示。为确保能够直观地观察不同层理角度试样的破坏差异,加载气压不易过高,过高会导致试样完全冲碎,丧失可比性,因此通过调整气室内的加载气压为稳定的0.4 MPa,使试样能够发生破坏又不至于过于破碎无法分辨,且实现加载速率与入射能的稳定,使每个试件获得相近的冲击能量以消除其他变量对试验数据的影响。

1.3 应力平衡

SHPB 试验装置的子弹将在气室气压的作用下高速撞击输入杆,在输入杆内部产生沿输入杆向试样方向传播的一维应力波,由于杆件与试样波阻抗的不同,应力波一部分将反射回输入杆,另一部分将透过试样进入输出杆,试验获得如图4所示的本次

试验典型入射波、反射波及透射波曲线图。



图2 不同层理角度千枚岩试样

Fig. 2 Phyllite samples with different bedding angles

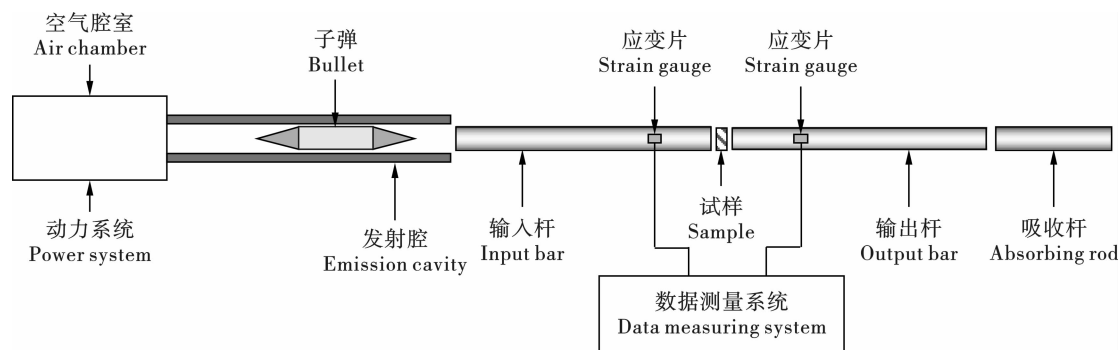


图3 分离式霍普金森杆装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of SHPB

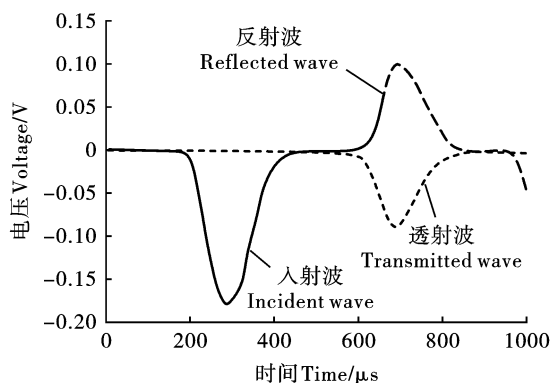


图4 SHPB 试验入射波、反射波及透射波曲线

Fig. 4 SHPB test incident wave, reflected wave and transmitted wave curve

在短时间内经过数次透射与反射后,试样输入端与输出端应力趋于平衡,如图5所示。

1.4 力学参数计算

依据 SHPB 试验技术的基本假定^[27],在一维假设与均匀假设的基础上,可通过应力波波形,确定岩石试样平均应变率 $\dot{\varepsilon}$ 、平均应变 $\bar{\varepsilon}$ 和试样两端应力

平均值 $\bar{\sigma}$ 等动态力学参数

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}(t) &= \frac{E_0 A_0}{\pi L D} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \\ \bar{\varepsilon}(t) &= \frac{C_0}{D} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \\ \dot{\varepsilon}(t) &= \frac{C_0}{D} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \end{aligned} \right\} (1)$$

式中, E_0 为本次试验装置杆件的弹性模量; A_0 为输出杆与输入杆的横截面积; C_0 为试样两端杆件内部的内应力波弹性波速; L 为岩石试样的几何厚度; D 为岩石试样横截面直径; $\varepsilon_I(t)$ 表示入射应变, $\varepsilon_R(t)$ 表示反射应变,而 $\varepsilon_T(t)$ 则表示透射应变。

2 千枚岩动态力学特性

2.1 应力-应变曲线特征

本次试验将获得干燥与饱和两种含水状态下千枚岩试样不同层理角度的应力-应变关系曲线,如图6所示。

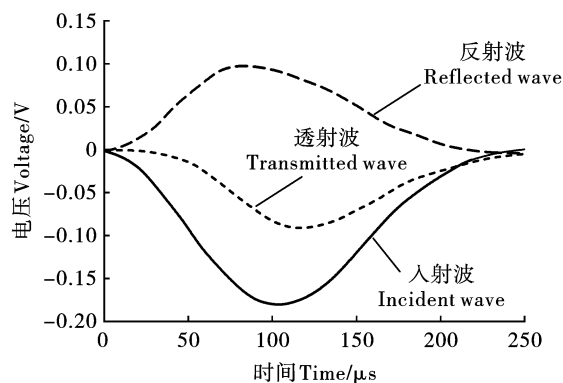
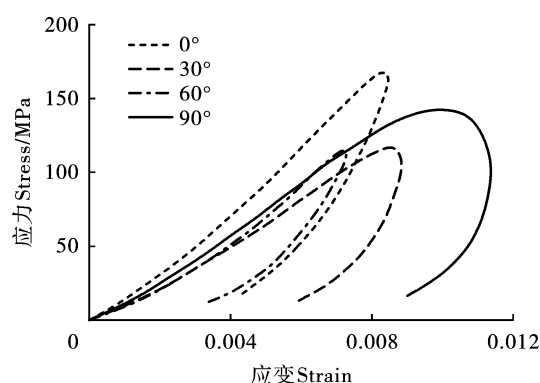


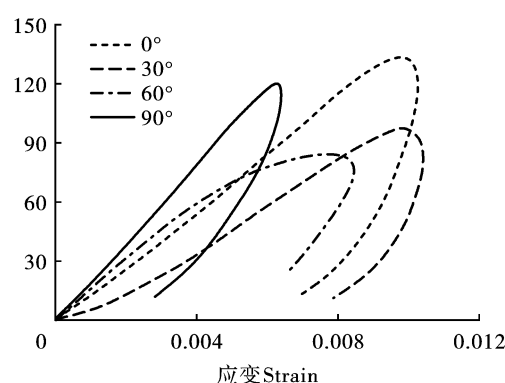
图5 应力平衡

Fig. 5 Stress equalization



(a) 干燥状态应力-应变曲线

(a) Dry state stress-strain curve



(b) 饱和状态应力-应变曲线

(b) Saturated state stress-strain curve

图6 不同层理角度试件应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of specimens with different bedding angles

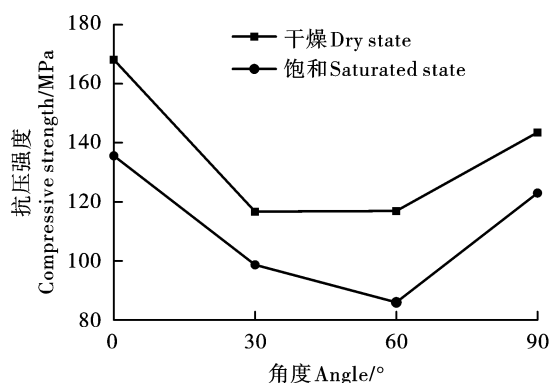
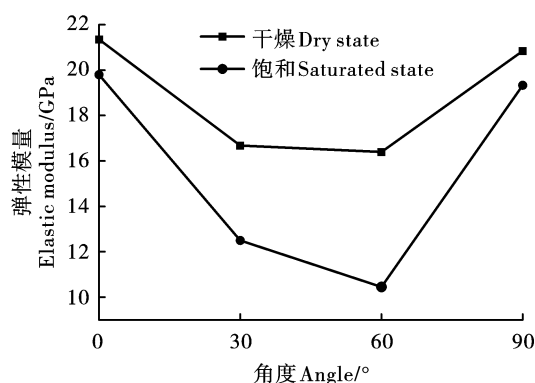
(a) 不同层理倾角试件抗压强度变化
(a) The change of compressive strength of specimens with different bedding angles(b) 不同层理倾角试件弹性模量变化
(b) The change of elastic modulus of specimens with different bedding angles

图7 两种状态下不同层理倾角试件强度参数变化

Fig. 7 The change of strength parameters of specimens with different bedding dip angles in two states

结合如下图8所示岩石试件的力学模型分析,认为千枚岩试件在受冲击荷载发生应力应变变形的过程中,冲击力沿层理角度方向分化出一个剪切力 $F_{\tau} = F \sin \beta$ (F 为动态作用力等效为静态),使得试件易发生纯剪切破坏,所以试件 60° 层理试件弹性

由图6可知,饱和状态下千枚岩单轴动态抗压强度均小于干燥状态,在层理角度方面,单轴动态抗压强度均为 $0^\circ > 90^\circ > 30^\circ > 60^\circ$,两种状态下 60° 层理角度的千枚岩动态抗压强度最低,其弹性模量也最低的。

2.2 强度参数特征

试验获得两种状态下层状岩样抗压强度与弹性模量等岩石强度参数,并绘制如图7所示曲线图。

由图7可知,在饱和状态下不同层理倾角试件弹性模量与抗压强度均有所降低,这是由于水对岩石内部结构的弱化作用造成的。其中 60° 层理千枚岩弹性模量减少幅度明显大于其余角度。

模量与抗压强度最小。

2.3 试样破坏特征

不同层理面加载角度条件下,干燥和饱和两种含水状态的千枚岩试样的单轴压缩破裂形貌特征如图9所示。

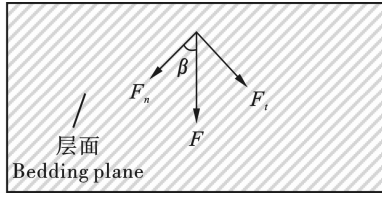


图 8 岩石试件的力学模型

Fig. 8 Mechanical model of rock specimen

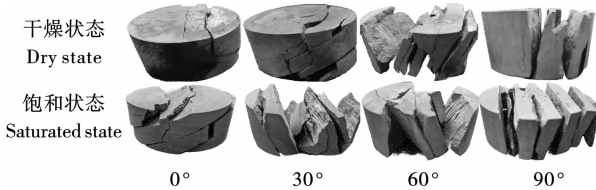


图 9 试件破坏照片

Fig. 9 Specimen damage photos

由图 9 可知,当层理面倾角为 0° 时,千枚岩试样主要沿垂直于层理面的方向出现剪切破坏,破坏面呈现不规则形态,并且破坏面与试样轴线形成一定角度的斜交关系。当层理面倾角处于 30° 和 60° 时,千枚岩试样主要沿着层理面产生剪切破坏,同时伴有少量的次级剪切面。这表明在这些层理角度下,千枚岩试样的变形与破坏过程受到岩体层理面的主导作用。当层理面倾角为 90° 时,千枚岩试样表现出沿轴向的劈裂破坏特征,局部区域还存在错落挤压的现象。此类破坏形态的形成,主要归因于层理面之间岩石的“压杆”失稳。

分析饱和与干燥两种含水率条件下的岩样破坏形态可知:当层理面倾角为 0° 时,试样在两种不同状态下的破坏形态大致相似,饱和状态对其破坏形式的影响效果不明显。当层理面倾角为 30° 和 60° 时,其抗压强度在很大程度上受到层理面的制约;与此同时,水分对岩样产生了削弱效应,降低了层理面以及岩体的强度。因此,在饱和状态下,试样除了沿层理面发生剪切破坏外,还出现了次级剪切破坏,导致试样的破碎程度更高。在层理面倾角达到 90° 的情况下,层理面饱水后遭到水的软化作用,致使试样层理面间的强度降低,而动态冲击加载过程中作用于试样上的绝大部分荷载由层理面间的岩石来承受,导致饱和状态下试样发生“压杆”失稳破坏的现象更为显著,相较于干燥试样,其破坏后的破碎程度更为彻底。

3 冲击荷载下千枚岩能量耗散规律

3.1 能量计算

在利用霍普金森压杆试验装置进行千枚岩岩石

试样动态冲击试验的过程中,整个系统的入射能 $W_I(t)$ 、反射能 $W_R(t)$ 和透射能 $W_T(t)$ 可根据一维应力波理论,由下式计算求得

$$\left. \begin{aligned} W_I(t) &= E_0 C_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_I^2(t) dt \\ W_R(t) &= E_0 C_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_R^2(t) dt \\ W_T(t) &= E_0 C_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_T^2(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

忽略试验中压杆与岩石试样之间的能量损失,根据能量守恒定律,岩石试样破碎耗能 $W_S(t)$ 由下式计算获得

$$W_S(t) = W_I(t) - [W_R(t) + W_T(t)] \quad (3)$$

在 SHPB 试验中,由于试样尺寸不同,单位体积岩石破碎所消耗的能量也存在差异。为了反映试件的能量吸收情况,通常采用单位体积岩石试件吸收的破碎耗能,即破碎耗能密度来分析。该指标可以通过以下公式计算

$$w_d = \frac{W_S(t)}{V_s} \quad (4)$$

式中: w_d 为试件破碎耗能密度; V_s 为试件体积。

根据式(1)~(4)将超动态应变仪所采集到的电信号转换为不同层理角度试样的能量参数,如表 1 所示。

3.2 不同层理角度下能量分布曲线

由表 1 数据得两种状态不同层理角度能量比率曲线,如图 10 所示。

由表 1 和图 10 可知,千枚岩饱和状态下各层理角度岩体破碎耗能比率整体大于干燥状态,但其干燥状态下的各角度透射能比率却大于饱和状态。干燥与饱和两种状态下 90° 倾角试件的透射能比率远高于其余角度,由图 7 所示试件简易二维力学模型可知,该角度下动态作用力方向与层理走向一致,在这一条件下动态作用力等效为作用于层理间裂隙的剪切力,加速了裂隙的沿伸,使得试件相比于其余角度更加的易碎^[28],破碎所消耗的能量也更小。而结合上述关于千枚岩动态抗压强度的研究,可以认为 90° 层理试件中内部结构完好的部分,顺沿作用力方向承担了大部分作用力,并将其传递至输出杆,致使两种状态下 90° 层理透射能比率均高于其余角度。

3.3 层理角度与破碎耗能密度

结合表 1 数据可以得出两种状态下,千枚岩试件不同层理角度与破碎耗能密度的关系曲线,如图 11 所示。

表 1 不同层理角度饱和千枚岩试样能量参数表(平均值)

Table 1 Energy parameters of saturated phyllite samples with different bedding angles(average value)

状态 State	角度 Angle/°	试件体积 Volume of specimen/ cm ³	反射能比率 Reflection energy ratio/%	透射能比率 Transmission energy ratio /%	破碎耗能比率 Crushing energy consumption ratio/%	耗能密度 Power-wasting density/ (J · cm ⁻³)	平均应变率 Average strain rate ε'/(s ⁻¹)	动态抗压强度 Dynamic compressive strength/MPa
干燥 Dry state	0	49.09	19.61	50.04	30.35	0.83	134.55	168.08
	30	49.13	18.33	48.18	33.49	0.65	125.24	114.66
	60	49.11	11.67	51.08	37.25	0.75	125.11	116.48
	90	49.10	6.99	77.56	15.45	0.36	124.39	144.20
饱和 Saturated state	0	49.08	15.85	39.57	44.58	0.97	146.24	136.76
	30	49.06	20.20	37.40	42.40	0.84	132.40	99.35
	60	49.20	23.67	35.74	40.59	0.87	136.64	84.83
	90	49.10	10.96	68.47	20.57	0.42	140.50	123.48

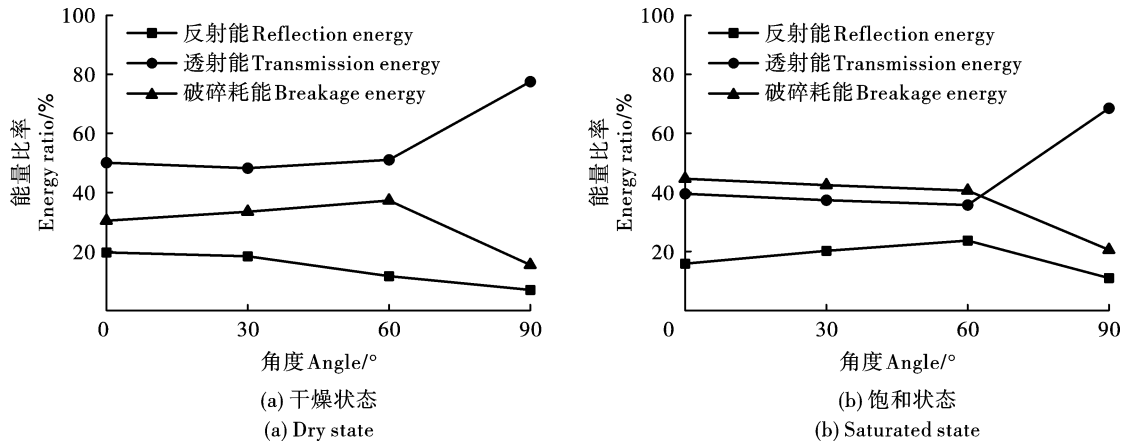


图 10 不同层理角度能量关系曲线
Fig. 10 Energy relationship curves of different bedding angles

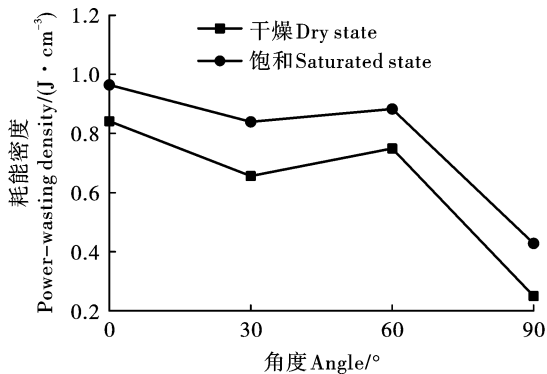


图 11 层理角度与破碎耗能密度的关系曲线
Fig. 11 Relationship curve between bedding angle and crushing energy density

由图 11 可知,饱和状态不同倾角的耗能密度均大于干燥状态,在试件处于饱和状态时,水将填充试件内部的细观裂隙,增加试件密度,并且水对裂隙的扩展有粘滞作用,减缓试件的破碎过程,增加试件破碎所需消耗的能量。

两种状态下不同层理角度千枚岩试件破碎耗能密度大小均为 $0^{\circ} > 60^{\circ} > 30^{\circ} > 90^{\circ}$, 0° 单位破碎耗能最高, 90° 倾角的试件耗能密度最低,与试件能量消耗符合。

4 冲击荷载作用下千枚岩破坏机制

基于对上述工况条件下千枚岩单轴动态压缩试验结果的深入分析可以发现,层理面倾角的大小和含水状态的改变对千枚岩的变形破坏特征以及能量耗散过程均产生了显著的影响。

4.1 层理面导致力学各向异性分析

岩石各向异性系数 a_c :可按照下式计算

$$a_c = \frac{\sigma_{(\beta=0^{\circ})}}{\sigma_{(\beta=n)}} \tag{5}$$

式中: $\sigma_{(\beta=0^{\circ})}$ 为试样层理倾角为 0° 时的强度; $\sigma_{(\beta=n)}$ 为为试样层理倾角为 n 时的强度, n 取 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。计算得到的结果如图 12 所示。

由图 12 可知,不同层理角度下,千枚岩的动态

力学强度具有显著的各向异性特征。当层理倾角为 0° 时,千枚岩试样的破坏形式主要表现为叠层岩石的压断破坏。此时,其刚度主要来源于束状的岩石组成矿物,这些矿物的存在使得层理间岩石的刚度能够得到充分展现,这也使得层理倾角为 0° 时千枚岩的弹性模量相对较高,同时,岩石破碎过程中所消耗的能量也较大。当层理倾角为 60° 左右时,千枚岩的变形特征受到软弱结构面(即层理面)的显著影响。在这种情况下,千枚岩主要是沿着层理方向发生剪切破坏,强度相对低,各向异性系数也最大。由于层理面的力学强度远低于层理两侧岩石的力学强度,因此导致整体岩石的刚性大幅度减弱。在该层理倾角下,千枚岩的弹性模量相对较低。当层理倾角为 90° 时,千枚岩的破坏行为表现出类似于层理间岩石的“压杆”失稳破坏。此时,层理间岩石抗压强度得到充分发挥,力学强度也较 60° 有大幅上升,且千枚岩弹性模量也较大,此时试样的破坏形式主要表现为劈裂破坏,千枚岩沿层理破碎所需的能量也更小,破碎耗能比率更低。

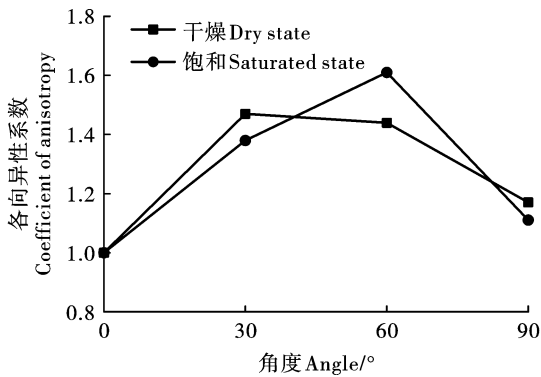


图 12 不同层理角度各向异性系数

Fig. 12 Anisotropic coefficients of different bedding angles

层状节理岩体在节理面影响下发生破坏时的单节理面强度准则,最早是由 Jaeger 根据单一弱面原理提出的^[29],具体如下

$$\begin{cases} \tau = c + \sigma_n \tan \varphi \\ \tau_j = c_j + \sigma_j \tan \varphi_j \end{cases} \quad (6)$$

式中: c 和 φ 分别是岩石材料内聚力和内摩擦角; c_j 和 φ_j 分别是弱面的内聚力和内摩擦角; σ_n 、 σ_j 和 τ 、 τ_j 分别对应沿两种薄弱面破坏条件下的相应的正应力和切应力。不同角度 β 下沿层理面破坏时的主应力 σ_1 、 σ_3 应满足

$$\sigma_1 \cdots \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \varphi_j)}{(1 - \tan \varphi_j \cot \beta) \sin 2\beta} + \sigma_3 \quad (7)$$

利用 Jaeger 强度准则求解得到的层状岩体强度

随层理面倾角呈“U”型曲线变化,这与图 7(a)所示的试验结果是相符合的,但是实际情况下 0° 和 90° 试样的强度大小往往存在一定差异。基于此, c 、 φ 应分别取两个不同方向的材料参数,分别记作 c_0 和 φ_0 、 c_{90} 和 φ_{90} ,强度准则可由式(6)修正为式(8),具体结果如图 13 所示

$$\begin{cases} \tau = c_0 + \sigma_n \tan \varphi_0, (0^\circ \leq \beta \leq \beta_{\min}) \\ \tau = c_{90} + \sigma_n \tan \varphi_{90}, (\beta_{\max} \leq \beta \leq 90^\circ) \\ \tau_j = c_j + \sigma_j \tan \varphi_j, (\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\beta_{\min}$ 、 $\beta_{\max}$ 分别发生结构面剪切破坏时的结构面倾角最大值与最小值。其中 $\beta_{\min}$ 中主应力按 0° 条件计算, $\beta_{\max}$ 中主应力按 90° 条件计算

$$\beta_{\min} = \frac{\varphi_j}{2} + \frac{1}{2} \sin^{-1} \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_j \cot \varphi_j) \sin \varphi_j}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \quad (9)$$

$$\beta_{\max} = 90^\circ - \frac{\varphi_j}{2} + \frac{1}{2} \sin^{-1} \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_j \cot \varphi_j) \sin \varphi_j}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \quad (10)$$

当 $\beta < \beta_{\min}$ 、 $\beta > \beta_{\max}$ 时,试样分别为剪切破坏以及“压杆”失稳破坏;当 $\beta_{\min} < \beta < \beta_{\max}$ 时,试件发生沿层理面的剪切破坏,且从下图中可以看出,层理倾角处于 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的中间位置时试样动态抗压强度达到最低值。

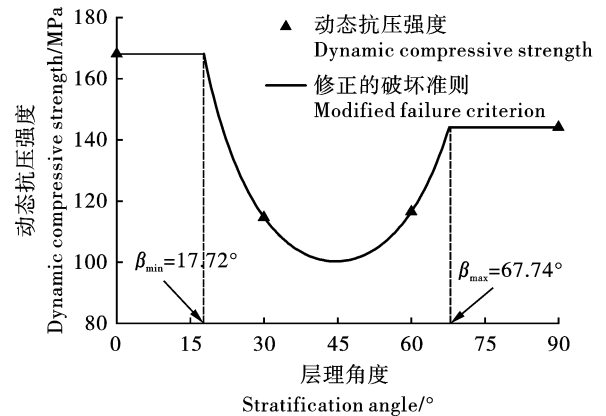


图 13 干燥状态下千枚岩不同角度下的破坏准则

Fig. 13 Rupture criteria of phyllite at different angles under dry condition

4.2 水-岩作用分析

对于相同层理倾角的试样,干燥状态下的试样表现出更高的动态抗压强度和弹性模量,而饱和状态下的试样则相对较低。这一差异是因为一方面相较于静态加载,动态冲击作用下千枚岩的变形速度较快,此时若岩石内部还有水分,存在于孔隙/裂隙内部水,在快速压缩变形的岩石内部来不及排除,产

生孔隙水压,有利于岩石内部胶接断裂和裂纹的扩展;另一方面岩石饱水后受到了水分对千枚岩矿物颗粒的弱化作用(图14)。水分子渗透到矿物颗粒之间,削弱了颗粒间的结合力,从而降低了矿物颗粒的刚度。这种弱化作用导致千枚岩的整体弹性模量下降,并进一步影响其抗压强度。由于水的侵蚀作

用强化了试样内部孔隙的发育和贯通,最终导致冲击破坏后破碎程度加深,裂纹的数量增加;此外,水这种柔性介质在能量传播过程中还存在一定的阻尼作用,这使得饱和状态下各层理角度岩体破碎吸收能比率整体大于干燥状态。

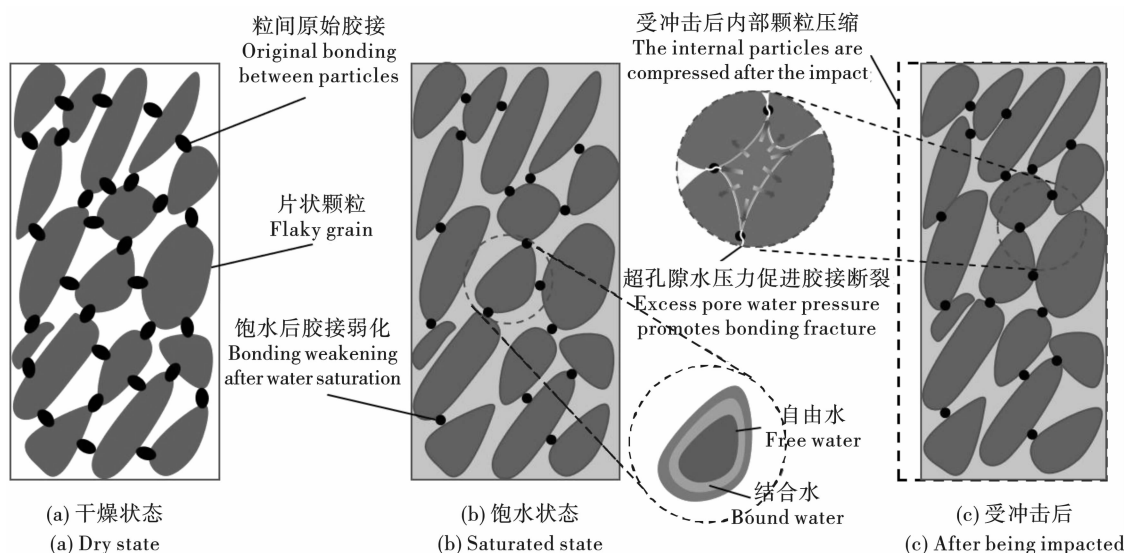


图14 动态冲击作用下水-岩相互作用机制

Fig. 14 Mechanism of water-rock interaction under dynamic impact

相对于干燥试样,饱和试样两种强度参数随层理倾角变化的规律与干燥试样基本相同,但各角度强度参数峰值却均出现下降,其中 60° 倾角弹性模量和抗压强度降幅最大。这是因为此时千枚岩的变形特征主要受控于层理面。此外,水的存在对层理面起到了软化作用,使得试样在相对较小的冲击荷载下就会发生沿层理面的剪切破坏。由于这种剪切破坏破坏过程主要沿着层理面发生,试样在径向上的变形受到了限制,导致径向应变相对较小,因此层理倾角为 60° 时弹性模量和抗压强度均最小。

4.3 层理面影响及水-岩作用联合作用机制分析

千枚岩的变形破坏模式受到层理倾角和含水状态的共同作用,且两者之间存在复杂的耦合关系,导致其力学行为表现出高度的复杂性和多样性,这种复杂性主要体现在饱水状态对千枚岩动态强度参数的影响程度因层理面倾角的改变而存在显著差异。总体而言,含水状态对层状千枚岩弹性模量和动态抗压强度的影响程度大小表现为: $60^\circ > 30^\circ > 90^\circ > 0^\circ$ 。这种规律是由于层理面法线方向与冲击荷载的施加方向在不同组合条件下,导致软弱结构面(即层理面)对千枚岩抗压特性的影响程度存在差异。

当千枚岩的层理面倾角为 60° 或 30° 时,千枚岩的抗压特性主要受控于层理面。层理面作为软弱结构面,其抗剪强度较低,且对水较为敏感。含水状态下,水分会进一步削弱层理面的抗剪强度,导致弹性模量和动态抗压强度显著降低。因此,含水状态对这两种倾角下千枚岩力学性质的影响最为显著。而当层理面倾角为 0° 时,由于层理面与轴向力方向垂直,层理面的抗压作用相对较强。此外,层理间岩石的刚度和强度也能较好地发挥,使得千枚岩整体力学性质相对稳定。因此,含水状态对其弹性模量和动态抗压强度的影响较小。当层理面倾角为 90° 时,由于层理面与轴向力方向平行,层理面的抗压作用相对较弱,而层理间岩石的力学性质对整体抗压特性贡献更大。尽管层理面的强度也会因含水状态而降低,但由于其在整体抗压特性中的贡献相对较小,因此含水状态对其力学性质的影响程度介于 30° 和 0° 之间。值得注意的是,层理面对水的敏感性远远高于层理面间的岩石。

5 结论

本文采用分离式霍普金森压杆试验装置对干燥与饱和两种状态下的不同层理角度千枚岩试件进行

冲击动力学试验,研究干燥与饱和状态层状千枚岩试件在同一加载气压下的动力学特性及能量耗散规律,结论如下:

(1) 千枚岩的变形破坏模式受到层理倾角和含水状态的共同作用。层状千枚岩随着层理角度的增大,其动态抗压强度呈“U”型变化;在同一加载气压下,饱和状态千枚岩单轴动态抗压强度均小于干燥状态下千枚岩单轴动态抗压强度,且 60° 层理千枚岩强度参数值都是最低的,其在饱和状态下的降幅明显。

(2) 在入射能恒定的情况下,试件破碎耗能受层理角度与饱和环境共同影响,同一角度下饱和状态千枚岩破碎耗能大于干燥状态,而同一状态下 0° 层理千枚岩破坏过程为压断破坏,耗能较高; 90° 层理千枚岩受劈裂破坏影响,其破碎耗能与耗能密度最低; 60° 与 30° 层理千枚岩为沿层理面的剪切破坏,耗能密度相对较低。

参考文献 (References)

- [1] CHEN Long-long, WANG Zhi-feng, WANG Ya-qiong, et al. Characteristics and failure analysis of a railway tunnel collapse influenced by cavity in phyllite strata[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106794.
- [2] WU Ya-bin, YANG Dong-jie. Study on mechanical characteristics of phyllite by conventional triaxial compression under multi-factors coupling action[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 1-12.
- [3] 许江波, 余洋林, 孙国政, 等. 静动态压缩下千枚岩长径比效应影响研究[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(6): 43-57.
- [3] XU Jiang-bo, YU Yang-lin, SUN Guo-zheng, et al. Influence of phyllite aspect ratio under static and dynamic compression[J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(6): 43-57. (in Chinese)
- [4] 常伟学, 梁庆国, 李奇伟, 等. 富水千枚岩隧道大变形特征及控制措施研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(3): 236-244, 252.
- [4] CHANG Wei-xue, LIANG Qing-guo, LI Qi-wei, et al. Study on large deformation characteristics and control measures of water-rich phyllite rock tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(3): 236-244, 252. (in Chinese)
- [5] CHEN Jian-xun, LUO Yan-bin, LI Yao, et al. Variation of rock mass pressure during tunnel construction in phyllite stratum[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(1): 3918787.
- [6] XU Guo-wen, HE Chuan, BAI Rong-min, et al. Experimental and numerical study of phyllite's anisotropic behavior in 3D space under brazilian test conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57: 10747-10784.
- [7] ZHANG Jia-bing, DU Rong-huan, CHEN Yi-ling, et al. Experimental investigation of the mechanical properties and energy evolution of layered phyllite under uniaxial multilevel cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(6): 4153-4168.
- [8] ZHAO Jin-peng, TAN Zhong-sheng, LI Qing-lou, et al. Characteristics and mechanism of large deformation of squeezing tunnel in phyllite stratum[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2023, 61(1): 59-74.
- [9] LI Yong-fei, ZHAO Bao-yun, YANG Jiao-sheng, et al. Experimental study on the influence of confining pressure and bedding angles on mechanical properties in coal[J]. Minerals, 2022, 12(3): 345.
- [10] GUO Xiao-long, TAN Zhong-sheng, WANG Xiao, et al. Effect of bedding angle and mineral composition on mechanical properties and fracture behavior of phyllite under unloading confining pressures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38: 3611-3621.
- [11] FU He-lin, HU Kai-xun, SHI Yue, et al. Deformation behaviour and damage evolution of carbonaceous phyllite under cyclic triaxial loading[J]. Materials, 2023, 16(13): 4612.
- [12] GUO Xiao-long, FAN Xiang-sen, TAN Zhong-sheng. Deformation control benchmarks and secondary lining construction timing in squeezing phyllite tunnels: A case study of Chengdu-Lanzhou Railway[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 143: 105454.
- [13] VILLALOBOS F A, RODRIGUEZ P A, VERA M. Study of the anisotropic tensile and compressive strength of a foliated phyllite[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2023, 176(1): 15-26.
- [14] 王小良. 深部复杂应力路径下煤力学行为各向异性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2023.
- [14] WANG Xiao-liang. Anisotropic study of coal mechanical behavior under deep complex stress paths[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2023. (in Chinese)
- [15] 侯振坤, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2541-2550.
- [15] HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, GUO Yin-tong, et al. Experimental study on anisotropic properties of Long-

- maxi formation shale under uniaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(9): 2541-2550. (in Chinese)
- [16] 邓华锋,李涛,李建林,等. 层状岩体各向异性声学 and 力学参数计算方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S1): 2725-2732.
- [16] DENG Hua-feng, LI Tao, LI Jian-lin, et al. Study on calculation method of anisotropic acoustic and mechanical parameters of layered rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S1): 2725-2732. (in Chinese)
- [17] KOU Bao-fu, ZHANG Deng-ke, MENG Tao, et al. Micro and macro evaluation of tensile characteristics of anisotropic rock mass after high temperatures treatment-a case study of Lingshi Gneiss [J]. *Geothermics*, 2022, 102: 102409.
- [18] SHI Xiao-shan, ZHAO Yi-xin, DANESH N N, et al. Role of bedding plane in the relationship between Mode-I fracture toughness and tensile strength of shale [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(2): 14.
- [19] 刘奇,许家杭,李青海,等. 酸腐蚀下层状砂岩各向异性力学特性研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2024, 6(6): 66-77.
- [19] LIU Qi, XU Jia-hang, LI Qing-hai, et al. Study on the anisotropic mechanical properties of bedding sandstone under acid corrosion [J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2024, 6(6): 66-77. (in Chinese)
- [20] 刘运思,何楚韶,傅鹤林,等. 层状板岩动静拉伸力学特性及破坏模式研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(11): 2789-2797.
- [20] LIU Yun-si, HE Chu-shao, FU He-lin, et al. Study on dynamic and static mechanical properties and failure mode of layered slate [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(11): 2789-2797. (in Chinese)
- [21] 周喻,邹世卓,高永涛,等. 动载下层状岩体力学特性试验与数值模拟[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2023, 55(6): 93-109.
- [21] ZHOU Yu, ZOU Shi-zhuo, GAO Yong-tao, et al. Test and numerical simulation for mechanical properties of laminated rock mass under dynamic loading [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2023, 55(6): 93-109. (in Chinese)
- [22] 王健,李二兵,谭跃虎,等. 层状盐岩及泥岩夹层动态力学特性对比试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(12): 3002-3011.
- [22] WANG Jian, LI Er-bing, TAN Yue-hu, et al. Comparative experimental study on dynamic mechanical properties of bedded salt rock and mudstone interbed [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(12): 3002-3011. (in Chinese)
- [23] 杨仁树,李炜煜,方士正,等. 层状复合岩体冲击动力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(9): 1747-1757.
- [23] YANG Ren-shu, LI Wei-yu, FANG Shizheng, et al. Experimental study on impact dynamic characteristics of layered composite rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(9): 1747-1757. (in Chinese)
- [24] ZHANG Xue-min, OU Xue-feng, GONG Feng-qiang, et al. Effects of bedding on the dynamic compressive properties of low anisotropy slate [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 981-990.
- [25] 李地元,高飞红,刘濛,等. 动静组合加载下含孔洞层状砂岩破坏机制探究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2127-2140.
- [25] LI Di-yuan, GAO Fei-hong, LIU Meng, et al. Research on failure mechanism of stratified sandstone with pre-cracked hole under combined static-dynamic loads [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2127-2140. (in Chinese)
- [26] HUANG Lin-qi, GUO Yi-de, LI Xi-bing. Mechanical response to dynamic compressive load applied to shale after thermal treatment [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022; 102: 104565.
- [27] 王礼立,胡时胜. 应力波基础[M]. 3版. 北京:国防工业出版社, 2023.
- [27] WANG Li-li, HU Shi-sheng. *Foundation of stress waves* [M]. 3th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2023. (in Chinese)
- [28] LI Bo, YE Xin-na, DOU Zi-hao, et al. Shear strength of rock fractures under dry, surface wet and saturated conditions [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53: 2605-2622.
- [29] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rocks [J]. *Geological Magazine*, 1960, 97(1): 65-72.