冲击荷载下不同板理倾角板岩拉伸破坏机理研究

万启洲[1]，张丽敏[1]，陈国龙[1]，李天一[2]，杨超[2*]
（1. 中国水利电力对外有限公司，北京市 101149；2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室，湖北 宜昌 443002）

摘要：以密集板理板岩为研究对象，利用霍普金森杆开展不同板理角度与多级冲击气压下的动态巴西劈裂试验，结合高速摄像探讨了板理倾角与应变率对板岩动态拉伸力学行为的影响规律，并建立 FLAC^{3D}-PFC^{3D} 数值耦合模型，对室内试验结果进行了有效反演。结果表明：板岩的动态拉伸力学行为表现出显著的各向异性，名义动态抗拉强度随板理倾角增大而增大，破坏模式由板理面控制逐渐转向由基质强度控制，其中高气压高倾角下破坏裂纹的突变主要归因于板理各向异性与动态应力波传递路径的改变。数值模拟再现了从“沿层滑移”到“穿层劈裂”的宏观破坏演化过程，揭示了法向接触力由分散偏移向加载方向高度集中的细观力学机制。研究成果可为层状围岩地下工程动力灾害预测与支护设计提供理论参考。

关键词：板岩；冲击荷载；板理面角度；巴西劈裂试验；数值模拟
中图分类号：TU45 **文献标志码：**A

Study on tensile failure mechanism of slate with different bedding inclinations under impact loading

Wan Qizhou[1], Zhang Limin[1], Chen Guolong[1], Li Tianyi[2], Yang Chao[2*]
(1. China international water & electric corp, Beijing 101149, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards in the Three Gorges Reservoir Area of the Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002,China)

Abstract: Taking densely bedded slate as the research object, dynamic Brazilian splitting tests were conducted using a Hopkinson pressure bar under different bedding angles and multi-level impact pressures. Combined with high-speed photography, the effects of bedding inclination and strain rate on the dynamic tensile mechanical behavior of slate were investigated. A FLAC^{3D}-PFC^{3D} numerical coupling model was established to effectively reproduce the laboratory test results. The results show that the dynamic tensile mechanical behavior of slate exhibits significant anisotropy. The nominal dynamic tensile strength increases with increasing bedding inclination, and the failure mode gradually transitions from being controlled by bedding planes to being dominated by matrix strength. The abrupt change in failure cracks under high pressure and high inclination is mainly attributed to the combined effects of bedding anisotropy and changes in dynamic stress wave propagation paths. The numerical simulation reproduces the macroscopic failure evolution process from "slip along bedding" to "penetration across bedding", revealing the micromechanical mechanism in which normal contact forces shift from dispersed and offset distribution to highly concentrated alignment along the loading direction. The research findings can provide theoretical references for dynamic disaster prediction and support design in layered surrounding rock underground engineering.

Key words: slate; impact loading; slate surface angle; Brazilian splitting test; numerical simulation

0 引言

作为一类广泛分布的变质岩，板岩主要由矿物颗粒经轻微变质作用形成，是地下洞室、边坡等岩体工程中常见的围岩类型[1-2]。由于具有显著的板理构造，板岩的力学行为表现出明显的各向异性特征，其强度、变形和破坏模式随板理面与主应力方向之间夹角的变化而明显变化，是控制围岩稳定的关键影响因素[3-4]。在深埋隧洞及地下厂房等大型工程建设中，板岩地层常因爆破开挖扰动诱发动态拉伸破坏，进而引发拱肩片帮、层理剥落乃至围岩局部垮塌等工程灾害，严重威胁施工安全与长期运营稳定。因此，深入研究板岩在动态拉伸荷载下的力学响应与破坏机制，具有重要的工程现实意义。

收稿日期：2026-07-14 **修回日期：**2026-09-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目(编号：42177132)；中国水利电力对外有限公司基金资助项目(编号：CWE-SJW-001/24)
作者简介：万启洲，男，高级工程师. E-mail：wanqizhou@cccltd.cn
***通信作者：**杨 超，男，博士，教授. E-mail：yangchao@ctgu.edu.cn

关于板岩力学特性随板理角度变化的试验研究，最初主要采用静态加载的方法。如罗旭光[5]、奚家米等[6]、胡涛涛等[7]针对不同倾角板岩开展了三轴压缩试验，发现峰值强度和弹性模量随倾角的增大呈先减小而后增大的特征；叶海旺等[8]通过开展不同空间加载位置关系的直剪试验，探究了层理弱面对板岩渐进破坏模式的影响。结果表明，倾角 90°试样的强度可达 0°倾角试样强度的 10 倍以上；在拉伸力学方面，李二强等[9]、胡涛涛等[10]通过巴西劈裂试验分析了层理倾角的影响，发现不同倾角下板岩的最大抗拉强度是最小抗拉强度的 3.49 倍。这些研究都体现了板理角度对板岩各类强度的重要影响。

近年来，随着实验技术的进步，越来越多的学者结合边坡或隧道采用爆破开挖的实际，利用霍普金森杆试验研究层状岩体的动态力学特性。如徐伟杰等[11]对 5 种板理面倾角的板岩试样开展了动态压缩试验，分析了不同倾角下板岩的破坏机理，并指出其是导致岩体动态压缩强度变化的关键因素；李国梁等[12]针对层状砂岩制备了 7 种不同倾角试样，并开展冲击压缩试验，发现强度呈先减小后增大的“U”形分布；卢毓崟等[13]则研究了冲击荷载下锚固方式与层理倾角对岩体强度的影响规律；在动态拉伸力学方面，Liu 等[14]探究了加载速率与层理倾角对层状板岩力学特性及破坏机制的影响，并针对 7 种倾角板岩提出了描述加载速率与破坏荷载关系的非线性公式。

结合试验结果，部分学者还通过数值模拟分析了层状岩体在荷载作用下的微细观演化过程。如黄薇等[15]基于颗粒流对层状页岩的巴西劈裂特征进行了模拟，指出层理倾角与层理面粘结强度比值是控制破坏模式与强度的关键因素；陶志刚等[16]通过颗粒流程序模拟分析了炭质层状板岩在不同围压条件下的微裂纹扩展过程及能量演化机制。

总结国内外研究现状发现，板岩在冲击荷载作用下呈现显著各向异性的观点已基本达成共识。然而，作为地下工程开挖中主要破坏模式之一，动态拉伸下层面倾角-应变率耦合裂纹演化机制，以及不同倾角下岩体的破坏模式，目前研究仍不够系统。在数值模拟方面，虽然采用离散元方法分析试样的裂纹扩展具有显著优势，但若杆件也由大量离散单元体构成，将大幅增加计算时间成本。相比之下，引入连续体杆件，采用离散元-有限元建立耦合系统，既能在保证力学对等传递的前提下，有效避免运算时间成本过高的问题[17-18]。鉴于此，本文利用霍普金森杆对板岩开展巴西劈裂试验，从抗拉强度和破坏特征等方面分析了板理倾角的影响，并在此基础上总结破坏模式；同时通过 PFC^{3D}-FLAC^{3D} 耦合模拟，进一步揭示了裂纹扩展的微观机理。所得结论可为板岩地下洞室爆破开挖中预判围岩失稳区域、优化支护时机与支护参数提供借鉴和参考。

1　试样制备及方案

试验用板岩来自于某大型地下洞室工程，其颜色为浅灰色，丝绢光泽，密度约 2.78 g/cm³。板理面分布密集，呈薄层状，走向平直且间隔较为均匀（间距约 1-2 mm）。X 射线衍射（XRD）测试结果显示，板岩的矿物组成具有显著的非均质性：基质部分的主要矿物成分以石英为主（含量约为 62.2%），次要为钠长石（含量约 19.2%）和绿泥石（含量约 17.3%）；相比之下，板理面中的石英含量较低（约为 47.3%），而富含片状的软弱矿物绿泥石（含量增至约 26.2%）。静态拉伸和直接剪切结果显示，板理面的抗拉强度约为 5.91 MPa，粘聚力和内摩擦角分别为 12.03 MPa 和 50.9°。

为减小材料离散性的影响，所有试样均取自同一岩块。通过沿平行于板理面方向钻取岩芯，再经切割、打磨等工序，加工成直径为 50 mm、高度为 25 mm 的标准巴西圆盘试样。随后，对所有试样沿板理面方向进行波速测试，其波速集中在 5 200～5700 m/s 之间。剔除数据差异较大的试样后，得到最终用于试验的试样。

如图 1 所示，定义巴西劈裂加载方向与板理面的夹角为θ。为系统分析θ对板岩动态拉伸特性的影响，本文共设置了θ=0°、15°、30°、45°、60°、75°和 90°共 7 种不同工况。试验在三峡库区地质灾害教育部重点实验室分离式霍普金森压杆（SHPB）上进行，每种角度工况下，均采用低（0.10 MPa）、中（0.12 MPa）、高（0.14 MPa）三个等级的冲击气压进行加

载，其对应的应变率范围分别为 8.58 s^{-1}-35.82 s^{-1}、29.65 s^{-1}-75.15 s^{-1} 和 56.73 s^{-1}-91.62 s^{-1}。试验前，所有试样先完全喷涂白色喷漆，再使用散斑滚刷制作散斑图案。试验过程中，利用高速摄像机同步记录试样的动态破坏过程。高速摄像机的拍摄速率为每秒 72,000 帧，分辨率为 256×240 像素。为实现高速图像与应力波的同步采集，高速相机采用 TTL 触发方式：当入射杆上应变计的电压值低于−34 mV 时，示波器触发高速摄像系统启动，从而完整记录试样的破坏过程。

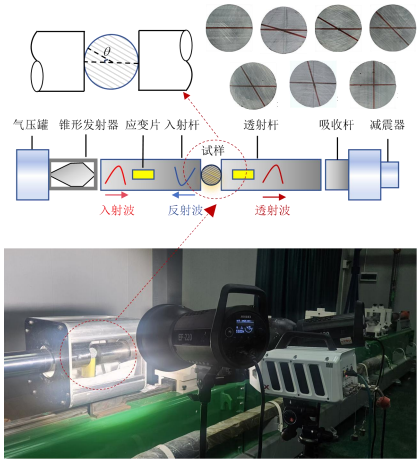


图 1　试验设计与试验照片

Figure 1　Experimental design and experimental photos

基于一维应力波理论，利用试件左端面处入射波、反射波和右端面处透射波数据，可计算试件内应力和应变等参数。考虑到巴西圆盘试件与杆接触为线接触，试件的直径远小于撞击杆的长度；且当应变率低于 10^3 s^{-1} 时，岩石材料的动态本构关系可取与静态相同的形式，故可将试件两端所受应力的平均值视为整个试件内的应力。于是试件在冲击荷载下的应力$\sigma_s(t)$、应变$\varepsilon_s(t)$和应变率 $\dot{\varepsilon}_s(t)$ 分别为：

$$\sigma_s(t)=\frac{p_1(t)+p_2(t)}{\pi DB}=\frac{EA}{\pi DB}\left[\varepsilon_I(t)+\varepsilon_R(t)+\varepsilon_T(t)\right] \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t)=-\frac{c_0}{D}\int_0^t\left[\varepsilon_I(t)+\varepsilon_R(t)+\varepsilon_T(t)\right]\mathrm{d}t \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t)=\frac{\mathrm{d}\varepsilon_s(t)}{\mathrm{d}t}=-\frac{c_0}{D}\int_0^t\left[\varepsilon_I(t)+\varepsilon_R(t)+\varepsilon_T(t)\right] \quad (3)$$

式中，E 为杆弹性模量，取 206 GPa；A 为杆的横截面面积；D 为试件径，取 50 mm；B 为试件厚度，取 25mm；c_0 为杆中弹性波速，取 5122.7 m/s；$\varepsilon_I(t)$、$\varepsilon_R(t)$和$\varepsilon_T(t)$分别为试件左端面入射应变信号、左端面反射应变信号和右端面透射应变信号。计算中$\varepsilon_s(t)$取时程上的最大值即为试样抗拉强度。

2　试验结果分析

2.1 试样破坏过程

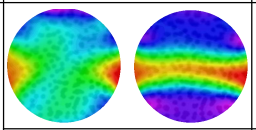
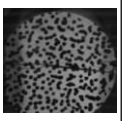
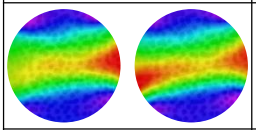
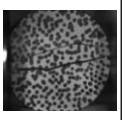
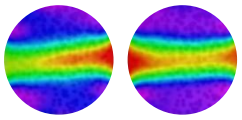
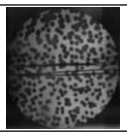
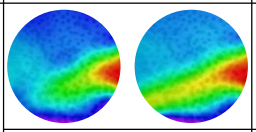
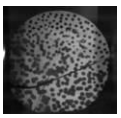
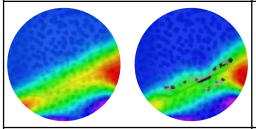
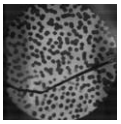
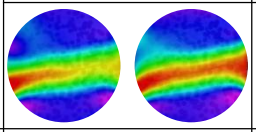
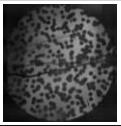
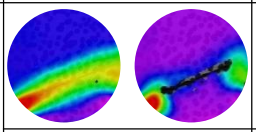
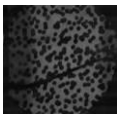
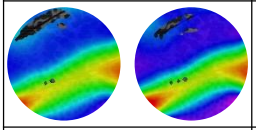
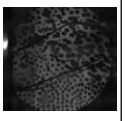
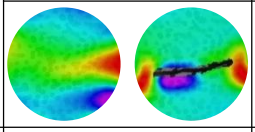
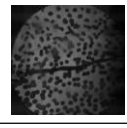
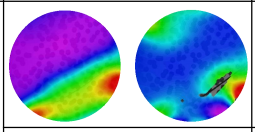
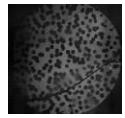
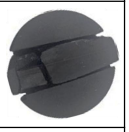
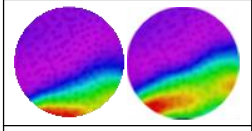
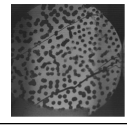
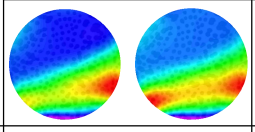
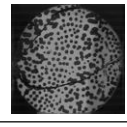
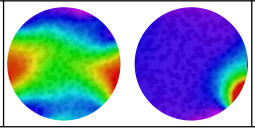
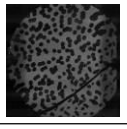
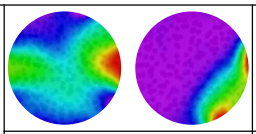
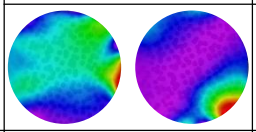
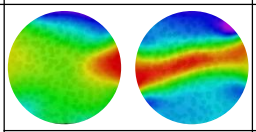
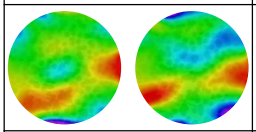
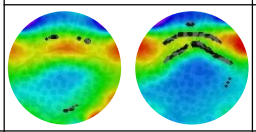
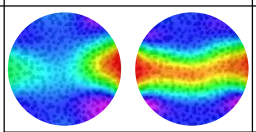
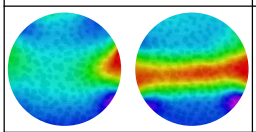
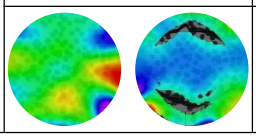
表 1 显示了试样在不同工况下的破坏过程应变云图、破裂瞬间以及最终破坏图。可以看出，在θ=0°~60°时，不同倾角试样在破裂瞬间产生的初始贯通裂纹基本不受冲击气压的影响。当板理面平行于加载方向（θ=0°）时，裂纹首先在靠近透射杆一侧起裂，随后沿板理面稳定扩展并形成贯穿裂纹。裂纹两侧的变形带基本平行与板理方向，裂纹贯通后沿板理面形成较为平整的断裂面；θ=15°时，裂纹在透射杆端则沿板理面扩展，而在入射杆端出现与冲击荷载平行的裂纹，二者相交后贯通破裂。其中，与冲击荷载平行的裂纹长度较短，约为沿板理面裂纹长度的 1/3；θ=30°时，可观察到沿板理面方向出现一条或上下两条直接贯通的裂纹；而θ=45°和 60°时，破坏模式则有所不同。虽然试件整体上仍以单条裂纹贯通破坏，但裂纹扩展路径不再沿板理面，而是呈斜向发展，与板理面之间形成一定的夹角。冲击气压大小的影响主要体现在试样最终的破坏形态上。随着气压的增大，试样在初始破裂后产生的次生裂纹增多，破坏形态趋于破碎。这些次生裂纹主要为两类，一类平行于初始贯通裂纹，如 0.14 MPa 条件下的θ=0°和 30°试样；另一类则是垂直于平行的两条初始贯通裂纹并将其相连，如 0.14 MPa 条件下的θ=45°和 60°试样。

对于θ=75°和 90°试样，冲击气压越高，最终破坏也越破碎。与前述情况不同的是，这两种倾角下试样的初始贯通裂纹也随气压发生变化。θ=75°时，在 0.10 MPa 的低冲击气压下，试样基本沿加载方向贯通破坏；而在 0.12 MPa 和 0.14 MPa 的气压条件下，裂纹首先在入射杆和透射杆作用点产生，随后分别向上和向下呈弧形扩展，于接近中点位置相交并导致破坏，形成上侧下凹、下侧上凹的两条初始贯通裂纹。θ=90°试样时，裂纹演化模式与θ=75°基本相似。只是在 0.10 MPa 和 0.12 MPa 下出现了沿加载方向的初始贯通裂纹；而在 0.14 MPa 的高气压条件下出现了上侧下凹、下侧上凹的两条初始贯通裂

纹。

表 1 不同工况下试样破坏过程图

Table 1　Failure process of specimens in different cases

冲击气压/MPa	θ	应变云图	破裂瞬间	最终破坏图
0.10	0°			
0.12				
0.14				
0.10	15°			
0.12				
0.14				
0.10	30°			
0.12				
0.14				
0.10	45°			
0.12				
0.14				
0.10	60°			
0.12				
0.14				
0.10	75°			
0.12				
0.14				
0.10	90°			
0.12				
0.14				

2.2 力学参数变化特征

由于冲击荷载与板理面角度的共同影响，试样并未严格遵循巴西劈裂试验要求，形成沿加载轴线的、单一完整拉伸破坏面。因此，本文将试验所得强度定义为名义动态抗拉强度。图 2 为不同工况下板岩试样名义动态抗拉强度的变化曲线。可以看出，板岩的名义动态抗拉强度受气压与加载方向夹角的变化较为明显。在气压一定的情况下，试样的动态强度均随倾角θ的增加而逐渐增大；而当θ一定时，冲击气压越高，对应试样的名义动态抗拉强度也越大。当冲击气压为 0.10 MPa 时，曲线整体趋势平滑上升，未出现剧烈波动或拐点；而在冲击气压为 0.12 MPa 和 0.14 MPa 时，在θ=60°后则有较为明显的突增，且 0.14 MPa 下的突增更为明显。表明随着在高气压作用时，层面与冲击荷载角度越大，板岩的名义动态动态抗拉强度增长越显著。

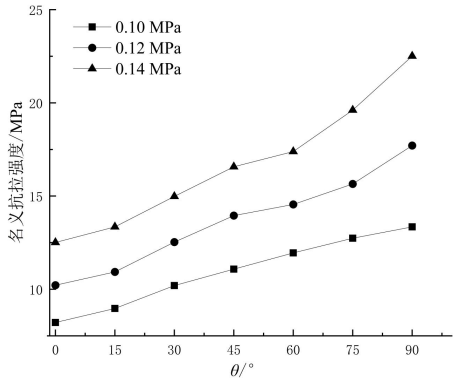
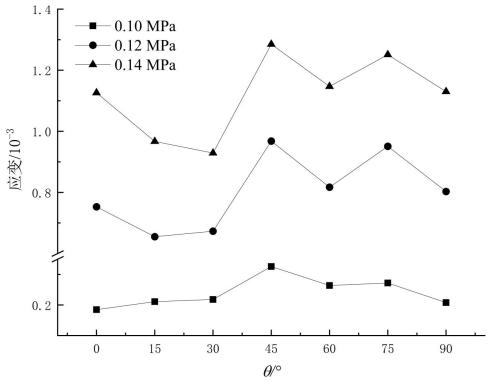


图 2　不同工况下板岩名义动态抗拉强度变化曲线

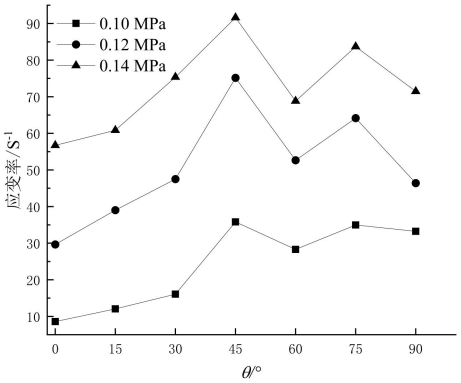
Figure 2　Variation curves of the nominal tensile strength of slate in different cases

图 3 (a)为不同工况下试样破坏应变随倾角变化曲线。可以看出，试样破坏应变受气压与板理倾角的共同影响较为明显。在气压一定的情况下，破坏应变总体随倾角θ呈现先增大后减小的变化趋势，并在θ=45°附近达到最大值。当冲击气压为 0.10 MPa 时，应变由θ=0°的 0.18%逐渐增大至θ=45°的峰值，较初始提高约 76.22%，随后在θ=60°~90°范围内整体呈下降趋势；在 0.12 MPa 和 0.14 MPa 条件下，其变化趋势与 0.10 MPa 基本一致，但在θ=0°~30°阶段应变略有下降。与此同时，在倾角一定条件下，破坏应变随气压升高而显著增加，其中θ=45°时由 0.33%增至 1.28%，增幅接近 4 倍，表明气压对破坏应变具有明显的放大作用。

图 3(b)为不同工况下试样破坏应变率随倾角变化曲线。在气压一定条件下，应变率随倾角θ在 0°-45°范围内逐渐增大，并在θ=45°附近达到峰值，随后略有下降并趋于稳定。当冲击气压为 0.10 MPa 时，应变率由θ=0°的 8.58 s^{-1} 逐步增至θ=45°的 35.82 s^{-1}，之后在θ=60°降至 28.29 s^{-1}，在θ=75°和 90°分别维持在约 34.97 s^{-1} 和 33.25 s^{-1} 水平；当气压提高至 0.12 MPa 和 0.14 MPa 时，应变率整体显著增大，并分别在θ=45°达到最大值 75.15 s^{-1} 和 91.62 s^{-1}。同时，在倾角一定条件下，应变率随气压由 0.10 MPa 增至 0.14 MPa 整体提高约 2~3 倍，说明气压升高对破坏过程中的变形速率具有显著增强作用。



（a） 倾角-应变曲线



（b） 倾角-应变率曲线

图 3　不同工况下板岩应变与应变率变化曲线

Figure 3　Variation curves of strain and strain rate of slate in different cases

2.3 裂纹扩展特征分析

基于试验结果 ，归纳出宏观裂纹扩展路径图如图 4 所示，其中，实线表示低气压，虚线表示中气压，点划线表示高气压。对于高倾角试样，线宽用于区分破坏时的主生裂纹和次生裂纹，其中粗线表示主生裂纹，细线表示次生裂纹。

可以看出，在θ=0°~30°时，中、高气压工况下裂纹的演化趋势与低压工况基本一致，呈现为典型的径向劈裂贯通，裂纹主体部分沿板理面稳定扩展。但θ> 45°后，破坏模式由单路径控制向多路径扩展转变，表现出显著的角度依赖性。当θ=45°、60°时，裂纹突变为两侧不贯通的双裂纹，裂纹未能继续向中心发展。随着角度进一步增大，当θ=75°-90°时，在低气压工况下，裂纹多起裂于试样底部或加载端附近，并沿自由面短距离扩展，整体呈现非贯通特征；而在中气压工况下，裂纹虽仍优先在边缘起裂，但

在扩展过程中逐渐向试样内部延伸，在θ=75°和 90°时可形成接近直径的主裂纹；在高气压工况下，裂纹演化更加复杂，破坏裂纹多点起裂并沿两组对称斜向路径发展，在θ=75°及 90°时形成由多条裂纹交汇构成的“菱形破坏”结构。

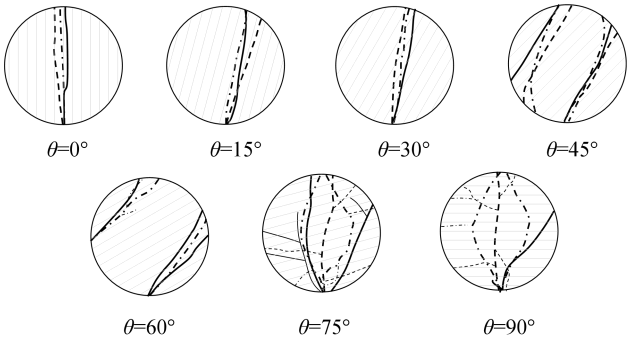


图 4　不同倾角试样裂纹扩展路径图

Figure 4　Crack propagation paths in specimens with different inclination angles

上述特征可以从应力分布以及应力波传播过程两个方面进行分析：（1）应力集中区的迁移控制了裂纹起裂位置与破坏模式。随着θ的增大，圆盘内部应力场变化模式为对称-非对称-对称分布。在θ=0°~30°时，最大主拉应力稳定集中于试样中心区域，裂纹优先在中心起裂并沿加载直径方向扩展，形成典型的中心劈裂破坏；当θ接近并超过 45°时，中心区域拉应力显著衰减，而加载端两侧及边缘区域逐渐演化为新的应力集中区，裂纹起裂位置随之由中心向边缘迁移，破坏模式由“中心起裂-贯通”向“边缘起裂-扩展”转变。当θ增大至 75°和 90°时，应力集中区在两侧再次逐渐呈对称分布，并向试样内部延伸。由于板理面接近垂直或垂直加载方向，会对裂纹扩展有一定的阻拦作用，在中气压工况下的扩展过程中，逐渐出现了次生裂纹。随着气压的提高，各裂纹在试样中部区域逐渐接近并发生交汇，最终形成由多条裂纹围合而成的稳定破坏结构。这种多区域应力协同作用进一步增强，应力峰值及其作用范围同步增大，使裂纹起裂更为充分、扩展更为连续，从而加剧了高角度条件下的多路径破坏特征。（2）应力波传播过程中的幅值衰减与叠加效应决定了裂纹的扩展能力及贯通特征。在θ<60°时，加载方向与板理面夹角较小，动态应力波在传导过程中极易诱发沿板理面的剪切滑移或张拉分离，弱面效应主导了破坏进程，因而宏观抗拉强度较低。在θ>60°时，板理面方向与加载轴线大角度相交，动态压剪应力波穿过多层弱面的阻力大幅增加。应力波在强弱相间的板理中发生多次反射与折射，导致能量在基岩内部高度积聚，使裂纹路径发生明显转变，这是高倾角下强度突增的主要原因。在低气压工况下，冲击加载所产生的应力波幅值有限，应力波在试样内部传播过程中会随着角度的增大导致反射、透射的幅值迅速衰减。冲击过程中，裂纹从边缘向试样内部扩展时，倾角增大会使应力波传播距离降低，进而影响其试样内部应力波强度，难以维持裂纹持续向中心扩展，从而导致裂纹在未贯穿直径前发生止裂，形成非贯通破坏特征。在中气压工况下，冲击加载所形成的应力波在传播过程中衰减相对减缓，在中心区域仍可形成有效叠加，使裂纹具备持续扩展能力，从而形成贯穿裂纹；而在高气压条件下，应力波反射与叠加作用显著增强，在试样内部形成多方向传播的应力波场，使多个区域同时达到破坏条件。

与已有研究对比，本文结果与静态及动态文献既有共性也存在差异。在静态条件下，胡涛涛等[10]对含软弱夹层炭质板岩的巴西劈裂试验表明，抗拉强度随软弱夹层倾角呈“U 型”分布，最小值出现在θ=45°；而本文动态试验中，板岩名义动态抗拉强度随θ单调递增。这一差异主要源于静态加载下弱面主导破坏，强度受控于板理面的抗拉强度；动态加载下，高应变率增强了材料的惯性效应，抑制了板理面优先破坏，使基质强度贡献占比增大，从而导致强度随θ单调上升。与 Liu 等[14]的动态巴西劈裂结果相比，两者均发现名义动态抗拉强度随θ增大而单调递增，但本文进一步揭示了中、高气压下θ=60°后强度突增的现象。此外，本文动态条件下破坏模式随θ和气压共同演化，低角度时沿板理面劈裂，高角度时出现弧形双裂纹，且气压升高使次生裂纹增多，反映了动态应力波传播与板理面相互作用对裂纹扩展路径的复杂调控。

3　动态冲击拉伸过程数值分析

3.1 FLAC^{3D}-PFC^{3D}耦合模型建立及调试

通过耦合方法建立 SHPB 模拟系统，其中系统中杆件是由 FLAC^{3D}（基于有限差分方法 FDM）构建的连续介质，以真实传递应力波；试样是由 PFC^{3D}(基于离散元方法 DEM)构建带有特定倾角板理面的板岩试样，实现了“宏观动载环境-细观岩石结构”的跨尺度耦合，具体如图 5 所示。

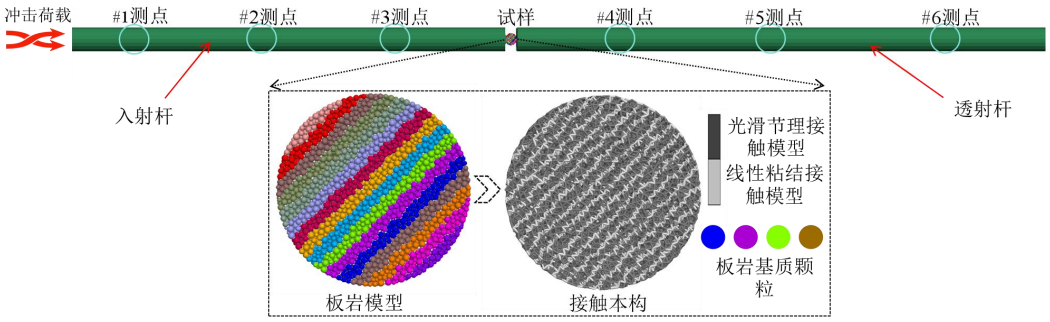


图 5　耦合 SHPB 系统

Figure 5　Coupled SHPB system

为了更好地仿真室内冲击荷载的施加，采用“等效荷载施加法”，即在入射杆端口设置扰动余弦波冲击荷载以模拟入射波，待冲击周期结束后移除施加的余弦波冲击荷载。施加的扰动余弦波在冲击过程中转换成透射波和反射波，进而实现运用 SHPB 压杆对动态巴西劈裂试验的模拟。其中扰动余弦波冲击速度是基于公式(4)建立，通过调控初始动载速度，可以实现对入射应力的控制，使其与室内试验结果对应，进而确立动载速度与应变率之间的关系。

$$P=\begin{cases}0, & t>T\\ \dfrac{1}{2}(1-\cos(\dfrac{2\pi}{T}t))f, & t<T\end{cases} \qquad (4)$$

式中，P 为施加扰动余弦冲击速率，T 为施加余弦波周期，f 为入射峰值速率，t 为冲击时间。其中室内入射波的持续时间为 300 μs，故本文同样设置余弦波周期为 300 μs。

图 6 分别展示了不同数值 f 下扰动入射应力波的应力-时间对应关系。可以看出，f 的增加应力变化较为明显，且应力峰值随着 f 数值增加而明显增加。当速度为 1 m/s 时，入射波峰值应力约为 50 MPa；当速度增大到 5 m/s 时，入射波峰值应力提高到约 200 MPa。根据入射应力峰值随速度的变化趋势，很容易匹配得到不同应变率（冲击气压）下与室内试验入射应力波峰值一致的动载速度。图 7 为应力波在杆件上的传播效果，接近 1 000 μs 时，应力波从入射杆传递到了透射杆。整体上看，水平应力最大值的变化可以较好地体现了应力波的传递过程。

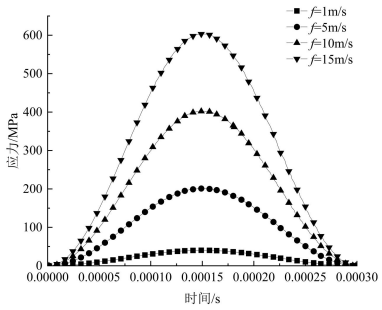


图 6　不同 f 取值应力-时间曲线

Figure 6　Stress-time curves with different values of f

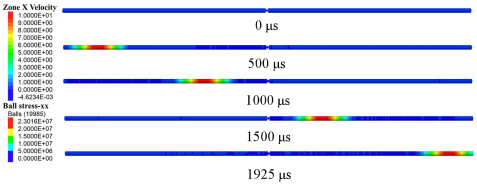


图 7　应力波在杆件上的传播

Figure 7　Propagation of stress waves in rods

验证动态加载系统是否成功建立并有效运行，主要取决于两项关键指标，其中之一是一维应力波评价，即评估应力波在传输过程中是否呈现较为平滑的余弦波形，且具有良好的规律性。图 8 展示了加载速度为 f=1 m/s 时，各监测点位轴向与纵向应力波的演化特征。可以看出，轴向和纵向应力波随入射时间增加均呈现出余弦规律性变化。

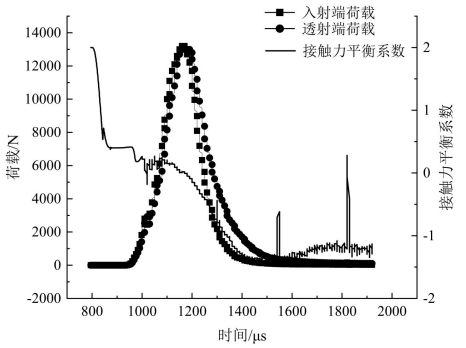


图 8　动态加载过程压杆系统平衡检测

Figure 8　Equilibrium detection of pressure bar system during dynamic loading

另一重要指标为均匀性评价，用于验证加载系统的平衡性。其主要通过观察接触力平衡系数μ以及入射端与透射端的荷载情况来进行综合判断：

$$\mu = \frac{2(F_i - F_t)}{F_i + F_t} \qquad (5)$$

式中，F_i为入射端荷载，F_t为透射端荷载。

从图 8 可见，入射端与透射端荷载峰值一致，约在 1100 μs 时接触力平衡系数在 0 附近，F_i与 F_t差值很小，系统逐渐进入平衡状态。在 1200 μs 后，试样发生较大程度的破坏，大量裂纹在试样中部区域产生，进而导致试样传递荷载能力的下降。因此，入射端荷载值下降速度较快，F_i与 F_t之间差值增大，μ值由零值减小到负值；在 1300 μs 后：试样入射端与杆件失去接触，F_i首先降为零值，μ值降至-1.5 左右波动，在 1500 μs 后，试样透射端与杆件失去接触，F_t降为零值，动态加载过程结束。经过上述 SHPB 的建立与平衡验证，表明该系统能够较好地模拟动态试验过程[19]。

板岩试样的建模流程如下：首先，在标准尺寸的刚性伺服墙内，采用随机紧密堆积法生成颗粒集合体，并通过迭代调试严格控制试样的密实度。其次，利用几何分区命令将模型沿轴向进行精细化切分，以此作为板理面植入的拓扑基础，实现层内基质与层间界面的差异化力学赋值。最后，基质颗粒间采用线性平行粘结模型模拟岩石的脆性断裂与裂纹扩展过程，板理面则采用光滑节理接触模型真实还原弱面的剪切错动、扩容效应及摩擦特性。不同倾角的板岩仅需通过旋转对应角度即可获得。采用“试错法”[19]对试样的微观参数进行标定，所得具体微观参数见表 2。此时，模拟结果与室内试验结果的对比如图 9 所示，二者吻合较好。

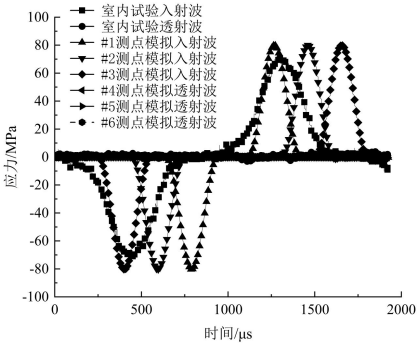


图 9　数值计算与室内试验结果对比

Figure 9　Comparison between numerical calculations and laboratory test results

表 2 离散元试样模型微观参数

Table 2　Microscopic parameters of discrete element specimen models

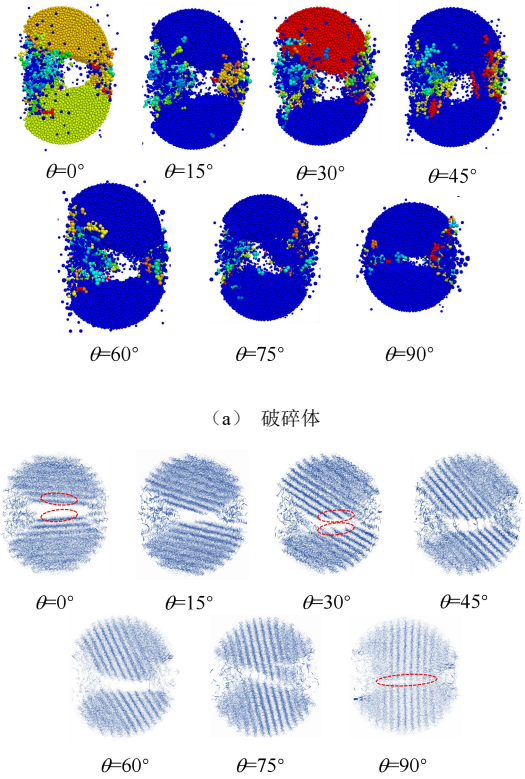
基质		板理	
E_C / GPa	1.25	$k_{n,sj}$ / GPa	10000
k_n / k_s	1	$k_{s,sj}$ /GPa	10000
$\bar{E}$ /GPa	1.25	μ_{sj}	0.30
$\overline{k_n / k_s}$	1	φ	41.00
μ	0.41	$\sigma_{n,sj}$ / MPa	40.00
$\bar{\sigma}_c$ /MPa	39.61	c_{sj} / MPa	53.00
$\bar{\tau}_c$ /MPa	44.40	local_damp	0.05

注：E_C为弹性模量、k_n / k_s为刚度比、$\bar{E}$为粘结弹性模量、$\overline{k_n / k_s}$为粘结刚度比、μ为摩擦系数、$\overline{\sigma_c}$为法向粘结强度、$\overline{\tau_c}$为切向粘结强度；$k_{n,sj}$为法向刚度、$k_{s,sj}$为切向刚度、μ为摩擦系数、φ为摩擦角、$\sigma_{c,sj}$为抗拉强度、c_{sj}为粘聚力、local_damp 为局部阻尼系数。

3.2 计算结果分析

图 10 为 0.1 MPa 下试样的最终破碎体及接触力链。从图 10(a)可以看出，各角度试样中心均发生明显的拉伸损伤，末端三角区破坏较为明显，而上下两端的主要碎片较为完整。随着角度的增加，同一气压下试样的开合程度逐渐减小。图 10(b)展示了试样从“沿层滑移”到“穿层劈裂”的演化规律：θ=0°时，断裂处整齐沿板理面断开，力链沿板理面连续分布，表现出明显的板理面拉伸特性；θ=15°~30°时，板理面力链开始部分断裂，弱面率先发生剪切滑移与剥离，但基质断裂尚不明显；θ≥45°时，板理面对裂纹扩展的导向作用减弱，破坏模式由沿层向穿层过渡；当θ>60°后，裂纹无法沿夹角极大的板理面顺畅扩展，必须强行“穿层”剪断高强度的基岩桥，克服极高的微观粘结断裂功与裂纹贯通阻力，从而表现为宏观动态抗拉强度在θ>60°后的显著突增；θ=90°时，裂纹垂直贯穿岩层，力链呈典型脆性断裂

特征，弱面效应被抑制。



（a） 破碎体

（b） 接触力链

图 10 试样最终破坏破碎体及接触力链

Figure 10 Final failure fragments and contact force chains of specimens

将数值模拟结果与图 4 及表 1 的试验破坏模式对比可知，二者高度吻合：θ=0°~30°时，模拟中试样沿板理面整齐断开，力链连续分布，与试验裂纹沿板理面稳定扩展一致；θ=45°、60°时，模拟显示力链部分断裂、破坏由沿层向穿层过渡，与试验中裂纹斜向发展、出现两侧不贯通双裂纹吻合；θ=75°、90°时，模拟再现了裂纹垂直贯穿岩层的穿层破坏特征，力链沿加载方向高度集中，对应了试验中高倾角下裂纹弧形扩展的模式。此外，数值模拟揭示了试验难以直接观测的细观机制：低角度下法向接触力呈分散偏移分布，弱面效应主导破坏；高角度下法向接触力沿加载方向高度集中，基岩强度成为控制因素。上述对比表明，数值模拟不仅较好地复现了室内试验的宏观破坏形态，还从细观接触力演化角度对试验现象的力学机理提供了有效补充。

图 11 和 12 分别为试样破坏时的法向接触数量及接触力空间分布，其呈现出明显的阶段性演化特征。当θ=0°~30°时，法向接触数量整体较少，法向接触力的量值偏低且呈现离散、无序的空间分布状态，其接触力高值区明显向板理面法向偏移；随着角度增至 45°时，微观接触状态发生转变，法向接触数量开始增多，法向接触力在三维空间内呈现出“多峰分散”的相对均匀分布趋势；而当θ=0°~30°时，法向接触数量进一步增加，法向接触力的高值分布再度向加载轴线聚集，并在θ=90°时沿加载方向高度集中，表现出极强的方向选择性与局部高接触力特征。

综上所述，板理面的空间方位直接调控了微观尺度下法向接触的生成数量及接触力大小的空间分布形态。随着倾角的改变，内部的法向接触作用发生显著的重分布，迫使法向接触力从低角度下的分散与偏移状态，逐步演变为高角度下沿主载荷方向的高度集中。这种法向接触数量与接触力的空间各向异性演化，揭示了不同倾角板岩在动态载荷作用下，微观受力状态的各向异性特征。

综上所述，板理面的空间方位直接调控了微观尺度下法向接触的生成数量及接触力大小的空间分布形态。随着倾角的改变，内部的法向接触作用发生显著的重分布，迫使法向接触力从低角度下的分散与偏移状态，逐步演变为高角度下沿主载荷方向的高度集中。这种法向接触数量与接触力的空间各向异性演化，揭示了不同倾角板岩在动态载荷作用下，微观受力状态的各向异性特征。

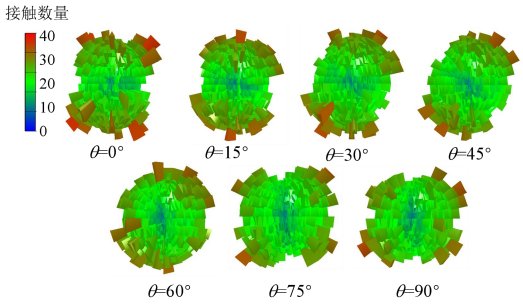


图 11 试样破坏时法向接触数量

Figure 11 Number of normal contacts at specimen failure

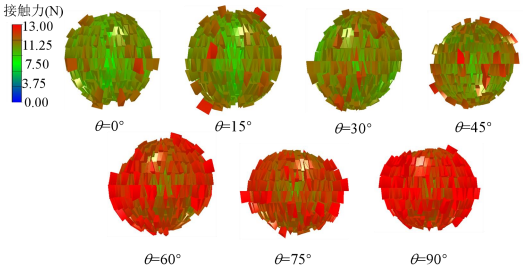


图 12　试样破坏时法向接触力分布

Figure 12　Distribution of normal contact forces at specimen failure

为定量评价不同板理倾角板岩在动态加载过程中的裂纹扩展特征，对三种气压下各角度试样的拉伸微裂纹数量进行了统计。结果表明：三个气压下，拉伸裂纹数量均随板理角度增加呈先增大后降低的趋势，在θ=45°时达到峰值，在θ=60°~90°时逐渐降低。以 45°为中间角度，角度互补的裂纹数量呈现近似对称现象，即θ=0°与 90°总裂纹数量相近，θ=15°与 75°相近，θ=30°与 60°相近。在总裂纹数量方面，0.10 MPa、0.12 MPa 和 0.14 MPa 的拉伸裂纹平均数量分别为 6 001、7 961、9 365。高角度试样（60°、75°、90°）相比低角度试样（0°、15°、30°）裂纹数量更多，说明低角度破坏时试样更容易沿板理弱面破坏，破坏后试样更完整；而沿基岩破坏的高角度试样裂纹数量更多，破碎更明显。

此外，对微裂纹的空间分布进行了统计。在气压一定时，θ=0°~30°时各角度裂纹数量呈增加趋势，其中 0°和 180°方向裂纹数量的增长速度较 90°和 270°更快；θ=45°时各方向微裂纹数量达到峰值，极值位于空间的 0°和 90°位置；θ=60°~90°时微裂纹数量出现回落，0°和 180°方向裂纹数量的变化速度仍较 90°和 270°更迅速。当角度一定时，随着气压升高，各角度裂纹数量逐渐增加，三个气压下裂纹空间分布图的比尺分别为 0~250、0~300 和 0~350，表明各角度裂纹数量随气压增大而增大。

4　结论

（1）板岩动态破坏过程受板理倾角θ与冲击气压共同影响。θ≤60°时，初始贯通裂纹基本不受气压影响：θ=0°~30°沿板理面扩展形成贯穿裂纹；θ=45°和 60°裂纹呈斜向发展，出现两侧不贯通的双裂纹。气压升高主要增加次生裂纹数量，使破坏更破碎。θ=75°、90°时，初始贯通裂纹随气压变化：低气压下沿加载方向贯通；中、高气压下裂纹从加载端起裂并呈弧形扩展，于近中点相交，形成上侧下凹、下侧上凹的两条初始贯通裂纹，气压越高破坏越破碎。

（2）板岩名义动态抗拉强度随θ增大而提高，随冲击气压升高而增大。低气压下强度随θ平滑上升；中、高气压下在θ=60°后出现明显突增，且高气压时突变更显著。气压升高对破坏过程中的变形速率具有显著增强作用，破坏应变与应变率均在θ=45°附近达峰值，且随气压升高显著放大，θ=45°时应变增幅近 4 倍，应变率提升约 2~3 倍。

（3）采用 FLAC^{3D}-PFC^{3D} 耦合法建立 SHPB 动态加载系统，杆件传递应力波，试样含特定倾角板理面，实现跨尺度耦合。经余弦波等效加载与平衡验证，系统可良好模拟动态试验。模拟结果表明：板理面倾角控制破坏模式，呈现从“沿层滑移”到“穿层劈裂”的演化；法向接触力由分散偏移演变为沿加载方向高度集中，揭示了动态荷载下板岩微观受力的各向异性特征。

（4）在工程应用方面，建议隧道爆破设计中，需考虑板理面与洞壁夹角关系，特别当角度大于 60°应适当增加周边眼装药量以克服强度突增；在支护设计中，可将θ=45°对应的峰值应变率作为锚杆动态承载力验算的关键工况，以确保支护结构在动力扰动下的安全储备。

参考文献：

References:

[1] 李剑, 颜良宇, 於开炳, 等. 硅质板岩剪切蠕变特性及边坡变形机理研究[J]. 中外公路, 2024, 44(4): 29-36.
LI Jian, YAN Liangyu, YU Kaibing, et al. Shear creep characteristics and slope deformation mechanism of siliceous slate [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4): 29-36.

[2] 钟扬, 高超, 张海太. 长时间停工条件下炭质板岩地层隧道围岩变形及支护结构补强研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 256-260.
ZHONG Yang, GAO Chao, ZHANG Haitai. Study on surrounding rock deformation and support structure reinforcement of tunnel in carbonaceous slate stratum under long-term shutdown[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 256-260.

[3] 杨永斌, 王庆, 王轶君, 高伟政, 李永亮. 基于组合赋权-EAHP-NCM 模型理论的层状围岩隧道风险评估计算[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 209-216.
YANG Yongbin, WANG Qing, WANG Yijun, GAO Weizheng, LI Yongliang. Risk assessment calculation of layered surrounding rock tunnel based on combination Weight-EAHP-NCM model theory [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 209-216.

[4] 张海太, 沈东, 陈洁金, 等. 富水炭质板岩地层隧道底部结构破损原因分析及防治措施探讨[J].中外公路, 2020, 40(2): 167-174.
ZHANG Haitai, SHEN Dong, CHEN Jiejin, et al. Cause analysis and prevention measures of tunnel bottom

structure damage in water rich carbonaceous slate stratum [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 167-174.

[5] 罗旭光. 化学侵蚀作用下层理炭质板岩三轴力学演化特征[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(12): 218-225.
LUO Xuguang. Triaxial mechanical evolution characteristics of bedded carbonaceous slate under chemical erosion [J]. Mining Research and Development, 2025, 45(12): 218-225.

[6] 奚家米, 苟陇平, 王磊, 等. 层状板岩各向异性特征及应力扩容规律研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(4): 136-145.
XI Jiami, GOU Longping, WANG Lei, et al. Study on anisotropic characteristics and stress-dilation law of layered slate [J]. Journal of Building Science and Engineering, 2025, 42(4): 136-145.

[7] 胡涛涛, 张哲昊, 王栋. 常规压缩下炭质板岩各向异性力学特征[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(6): 92-102.
HU Taotao, ZHANG Zhehao, WANG Dong. Anisotropic mechanical characteristics of carbonaceous slate under conventional compression [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(6): 92-102.

[8] 叶海旺, 蔡俊, 雷涛, 等.板岩渐进剪切破坏各向异性及其数值模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 945-954.
YE Haiwang, CAI Jun, LEI Tao, et al. Study on anisotropy of progressive shear failure of slate and its numerical model [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(4): 945-954.

[9] 李二强, 冯吉利, 张龙飞, 等.水－岩及风化作用下层状炭质板岩巴西劈裂试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2): 329-337.
LI Erqiang, FENG Jili, ZHANG Longfei, et al. Brazilian splitting test study on layered carbonaceous slate under water-rock and weathering interactions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2): 329-337.

[10] 胡涛涛, 王栋, 康志斌, 等.不同软弱夹层倾角炭质板岩的巴西拉伸强度试验及数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2025, 42(2): 347-357.
HU Taotao, WANG Dong, KANG Zhibin, et al. Experimental and numerical simulation study on Brazilian tensile strength of carbonaceous slate with different inclination angles of weak interlayers [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2025, 42(2): 347-357.

[11] 徐伟杰, 陈国龙, 徐枫, 等.不同板理倾角板岩强度特征与破坏机制的 SHPB 试验研究[J].水电能源科学, 2026, 44(7): 40-45.
XV Weijie, CHEN Guolong, XV Feng, et al. Study on the strength characteristics and failure mechanism of slate with different foliation dip angles under SHPB load [J]. Water Resources and Power, 2026, 44(7): 40-45.

[12] 李国梁, 卢志堂, 杨灿灿. 层状砂岩静动力学特性对比[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(33): 14 327-14 332.
LI Guoliang, LU Zhitang, YANG Can-can. Comparison of static and dynamic characteristics of layered sandstone [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(33): 14 327-14 332.

[13] 卢毓鉴, 于洋, 丰光亮, 等. 层理倾角与锚固方式耦合作用下砂岩的动态力学特性[J]. 爆炸与冲击, 2026, 46(6): 84-99.
LU Yuyin, YU Yang, FENG Guangliang, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of sandstone under coupled effects of bedding dip angle and anchoring methods [J]. Explosion and Shock Waves, 2026, 46(6): 84-99.

[14] LIU Yunsi, HE Chushao, WANG Shiming, et al. Dynamic splitting tensile properties and failure mechanism of layered slate [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 1-16.

[15] 黄薇, 闫治涛, 孙峰, 等. 层状页岩巴西劈裂破坏特征颗粒流模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 74-82.
HUANG Wei, YAN Zhitao, SUN Feng, et al. Particle flow simulation study on Brazilian splitting failure characteristics of layered shale [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(6): 74-82.

[16] 陶志刚, 于海军, 闫国斌, 等.炭质层状板岩三轴渐进破坏及能量演化机制[J]. 应用基础与工程科学学报, 2026, 34(1): 199-210.
TAO Zhigang, YU Haijun, YAN Guobin, et al. Study on triaxial progressive failure and energy evolution mechanism of carbonaceous layered slate [J]. Journal of basic science and engineering, 2026, 34(1): 199-210.

[17] 袁启航, 谭亿虹. 基于 FLAC-PFC 耦合的深基坑门架式双排桩受力分析[J]. 土工基础, 2025, 39(2): 280-284+292.
YUAN Qihang, TAN Yihong. Analysis of double-row pile frame as a deep excavation supporting system using FLAC-PFC coupled method [J]. Soil Engineering and Foundation, 2025, 39(2): 280-284+292.

[18] 李冬冬, 盛谦, 肖明, 等. 基于改进颗粒流声发射片的地下厂房洞室围岩局部损伤细观机制研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 117-129.
LI Dong-dong, SHENG Qian, XIAO Ming, et al. Meso-mechanism of surrounding rock local damage of underground powerhouse cavern based on improved particle flow acoustic emission sheet [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 117-129.

[19] 张涛, 蔚立元, 鞠明和, 等.基于 PFC3D-GBM 的晶体–单元体尺寸比对花岗岩动态拉伸特性影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3): 468-478.
ZHANG Tao, WEI Liyuan, JU Minghe, et al. Analysis on influence of crystal-element size ratio on dynamic tensile properties of granite based on PFC3D-GBM [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(3):

468-478.