

不同倾角影响层状复合岩体 NPR 锚固力学特性的试验研究

王 炯^{1,2}, 常译文^{1,2}, 刘 鹏^{1,2}, 姜 健^{1,2}, 韩 静^{1,2}, 何满潮^{1,2}, 罗爱忠³

(1. 中国矿业大学(北京) 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院, 北京 100083; 3. 贵州工程应用技术学院 土木建筑工程学院, 贵州 毕节 551700)

摘要: 研究复合岩石锚固试样的力学特性对于更好地揭示锚杆索支护复合岩层结构的变形和破坏机制具有重要意义。利用声发射和数字图像相关方法进行监测, 开展不同层理倾角及不同类型锚索支护下的锚固复合岩石力学特性试验研究。研究结果表明: PR 加锚试样的破坏程度和裂纹数量比 NPR 加锚试样更高; 2 种加锚砂-泥岩复合试样的抗压强度和 DIC 位移场的演化均具有明显的层理倾角效应 ($15^{\circ} \sim 45^{\circ}$), 抗压强度随着倾角的增长而逐渐降低, 复合岩样表面高位移区的分布与倾角的变化成正比, 岩样的破坏机制由 15° 倾角时小尺度破裂的聚集逐渐转变为 45° 倾角时界面滑移破坏; 层理倾角的变化对 PR 锚索和 NPR 锚索加锚岩样破裂特征及声发射参数的影响具有明显差异性, PR 锚索加锚岩样的剪切裂纹占比与高频段波形的占比与倾角变化成正比, 而 NPR 锚索加锚复合岩样的拉剪裂纹比例和波形频段分布对层理倾角的变化不敏感。研究为解决巷道砂-泥岩复合层状顶板的常见问题提供了思路, 推动了不同倾角层状复合岩体的巷道围岩锚杆索支护技术的发展。

关键词: 岩石力学; 复合锚固岩体; 层理倾角; NPR 锚索; 声发射; DIC

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)10-2551-14

Mechanical properties of NPR anchorage in layered composite rock mass under the influence of different dip angles

WANG Jiong^{1,2}, CHANG Yiwen^{1,2}, LIU Peng^{1,2}, JIANG Jian^{1,2}, HAN Jing^{1,2}, HE Manchao^{1,2}, LUO Aizhong³

(1. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

3. School of Civil Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie, Guizhou 551700, China)

Abstract: Understanding the mechanical behavior of anchored composite rocks is essential for revealing the deformation and failure mechanisms of bolted layered rock structures. The study examines the mechanical characteristics of sandstone-mudstone composite specimens under different bedding dip angles and cable support types, using acoustic emission (AE) and digital image correlation (DIC) techniques for monitoring. Experimental results indicate that specimens anchored with PR cables exhibit more extensive damage and a higher crack density than those reinforced with NPR cables. Both types of anchored composite specimens display a clear bedding angle effect ($15^{\circ} - 45^{\circ}$) on their compressive strength and surface displacement evolution. Specifically, compressive

收稿日期: 2025-04-25; **修回日期:** 2025-06-24

基金项目: 贵州省科技厅科技计划资助项目(黔科合重大专项[2024]029); 国家自然科学基金资助项目(U24A2085)

Supported by the Science and Technology Program Project of Guizhou Provincial Department of Science and Technology (Grant No. Qian-Ke-He Major Special Project [2024]029) and National Natural Science Foundation of China (NSFC) Funded Project (Grant No. U24A2085)

作者简介: 王 炯(1984-), 男, 2011 年于中国矿业大学(北京)岩土工程专业获博士学位, 现任教授, 主要从事矿山工程岩体力学、切顶卸压无煤柱自成巷(110/N00 工法)、深井软岩巷道支护及冲击地压机制与防治等方面的教学与研究工作。E-mail: wangjiong0216@163.com

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2025.0278

strength decreases progressively with increasing dip angle, and high-displacement zones on the specimen surface expand accordingly. Meanwhile, the failure mode shifts from localized small-scale cracking at 15° to interface slip failure at 45° . Notably, the bedding angle affects the AE characteristics of PR-anchored and NPR-anchored specimens in different ways. In PR-anchored samples, the proportion of shear cracks and high-frequency AE signals increases with dip angle, reflecting a clear sensitivity to bedding orientation. In contrast, NPR-anchored specimens exhibit relatively stable tensile-shear crack proportions and AE frequency distributions regardless of dip angle. These findings provide a theoretical basis for addressing stability challenges in roadways with layered sandstone–mudstone roofs and contribute to the advancement of bolting support technologies for composite rock masses with inclined bedding structures.

Key words: rock mechanics; composite anchored rock; bedding angle; NPR anchor cable; acoustic emission; DIC

1 引言

随着我国煤炭资源的开采深度不断加大,煤层赋存条件越发复杂,大采高、厚煤层放顶煤的开采面临诸多工程难题^[1-4],特别是强矿压、倾斜顶板引起的巷道围岩大变形控制难题,严重影响了煤炭资源的高效开采,巷道内需安装大量锚杆/索以控制围岩变形,据不完全统计,我国煤矿巷道顶板倾角在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 的巷道约占总数的30%,且顶板多以复合层状岩石为主^[5],层状复合岩石的岩性构成较为复杂,我国西北地区的岩性组成以砂岩、页岩、泥岩等沉积岩为主,巷道顶板主要以砂岩和泥岩的组合为主。目前,国内外学者对复合岩石力学特性展开了广泛的研究。肖长富等^[6]发现复合岩石的峰值强度始终高于各单一岩石中最低的峰值强度,低于单一岩石中最高的峰值强度。杨仁树等^[7]探究了红砂岩–灰砂岩的复合岩石的冲击动力学特性。周辉等^[8]研究了围压对水平层状复合岩石变形破坏特征的影响。Y. L. Tan 等^[9]借助声发射技术探究了RCF夹层复合岩石的破坏特征,腾俊洋等^[10]借助声发射和CT扫描技术,从微观角度对复合岩石的损伤演化过程进行了研究。H. A. Abbas 等^[11]使用声发射和超声波脉冲监测了风化复合砂岩–页岩的变形行为、裂纹萌生和裂纹损伤。近年来,声发射^[12-15]和数字图像相关技术^[16-19]常被应用于岩石力学试验无损监测,X. Qi 等^[20]采用声发射(acoustic emission, AE)和数字图像相关技术(digital image correlation, DIC)研究了层状复合岩体的力学损伤特性,建立了基于双重损伤因子表征的层状复合岩石损伤本构模型。此外,B. Xiong 等^[21]重点研究了利用DIC测试数据对裂纹类型进行定量和定性分析的方法,引入协方差矩阵以判断裂缝拉剪特性。

不难发现,在静、动荷载作用下,软弱结构面

对岩体强度具有显著弱化作用,加剧了岩体的各向异性,这对工程建设安全构成重大隐患。对此,工程中常采用锚杆对层状复合岩体进行加固。李恒等^[22]针对存在内部裂隙的复合岩层力学特性展开研究,发现双裂隙复合岩层峰值强度随层理倾角增大表现为“U”型变化规律。靖洪文等^[23]分析了层理角度和锚索数量对加锚大型节理岩石力学行为的影响,发现在同倾角下加锚节理岩石的峰值强度随着锚索数量增加呈现出非线性增长的趋势。葛修润和刘建武^[24]详细研究了锚杆对节理面抗剪性能的影响,结果表明较小剪切位移就能充分发挥杆体的抗剪作用。Y. Y. Lu 等^[25]对不同倾角的锚固层状砂岩进行了冲击试验,发现 45° 倾角下,锚固效应显著提高了层状砂岩的强度。此外,DIC技术还被应用于研究小行星探测的锚定工程,M. X. Li 等^[26]基于DIC计算结果和破坏面理论,探究了不同锚固角度和土工材料下,小行星探测钻锚装置的锚定失效机制及破坏过程,为锚定工程提供了试验参考。

目前相关学者在层状复合岩石的力学特性和具有层理倾角的普通锚杆/索加锚组合岩石破坏特征方面已发表大量研究成果,现有普通锚杆/索的支护材料均为泊松比(Poisson's ratio, PR)材料,即受拉时材料横向变形,PR锚杆/索支护材料在深部工程中受高围压和高地应力影响易产生颈缩导致锚杆/索破断失效。笔者团队基于深部井巷工程稳定性的需求研制了具有负泊松比特性(Negative Poisson's Ratio, NPR)的支护材料^[27],具有高恒阻、高预应力、大变形和抗冲击性能。初代NPR锚索由恒阻装置与PR材料的锚索组合而成,通过特殊结构实现NPR特性^[28],最新研发的二代NPR锚索通过材料彻底实现了NPR特性。目前以NPR锚索为核心的支护体系^[29-30]在深部软岩巷道支护过程中得到了广泛的应用,X. M. Sun 等^[31-32]研究了不同预紧力下的NPR锚索加锚单一岩性岩石在单轴和双轴压缩下的力学

特性,发现预紧力与 NPR 加锚岩石的峰值强度成正比关系。

综上所述,具有层理倾角的 NPR 加锚层状复合岩石的力学特性和破坏特征研究尚属空白,对此,笔者开展了不同层理倾角下的 PR 锚索加锚岩样(PR cable anchored specimen, PCAS)和 NPR 锚索加锚岩样(NPR cable anchored specimen, NCAS)的单轴压缩试验(uniaxial compression test, UCT),借助声发射技术和 DIC 方法,一方面讨论了 PR 锚索与 NPR 锚索加锚岩石力学行为差异以及不同层理倾角对于加锚复合岩石的影响,另一方面基于声发射速率、 $RA-AF$ 值、峰值频率分析和 DIC 位移场展开加锚复合岩石力学特性与破坏特征研究。所得的试验结论在科学研究层面能够与已有的岩石相似材料锚固试验进行对比,且对实际工程中锚杆支护具有指导意义。

2 NPR 加锚岩样制备与试验方案

本试验采取沁水煤田 3114 综采工作面 9#煤层顶板的砂岩和泥岩,煤层埋深 623 m,煤层厚度 0.67~1.35 m,平均厚度 0.97 m,倾角 3°~12°。上覆岩层伪顶泥岩厚 1.3 m、直接顶砂质泥岩厚 4.7 m。顶板岩样是在距煤层 1~2 m 范围采取,砂岩和泥岩样本的基本力学参数通过单轴压缩试验及巴西劈裂试验测定,抗压强度平均值分别为 57.38, 27.63 MPa,抗拉强度为 4.21, 2.15 MPa,弹性模量为 7.25, 2.55 GPa。

受现场条件限制,难以获取原位的复合岩样,因此利用现场取回的砂岩和泥岩进行切割,并将二者以 1:1 的体积比和 15°, 30° 和 45° 的接触面倾角进行组合拼接,考虑到钻孔损伤对试样强度的影响,用环氧树脂与聚酰胺树脂的合剂进行黏结。加工了 9 组共 18 块试样,试样尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm,用以模拟实际工程中 3 000 mm×3 000 mm×6 000 mm 尺寸的围岩。几何相似比 C_L 表示为

$$C_L=L_p/L_m=60 \tag{1}$$

式中: L_p 为原型尺寸, L_m 为模型尺寸。

制备的试样根据加锚的情况和层理倾角分为未加锚、PR 锚索加锚、NPR 锚索加锚试件,分别记作 W 类、P 类、N 类,倾角为 15°, 30° 和 45° 的试样分别记为 15, 30, 45,由此试样编号分别为 W-15/W-30/W-45, P-15/P-30/P-45, N-15/N-30/N-45。岩样的基本物理参数如表 1 所示。

表 1 不同锚固类型的砂-泥组合岩样的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of sandstone-mudstone composite samples with different anchoring types

试样	倾角/ (°)	编号	质量/ g	密度/ (g·cm ⁻³)	纵波波速/ (km·s ⁻¹)
未加锚	15	W-15	479.86	1.89	2.86
	30	W-30	479.82	1.89	2.73
	45	W-45	479.92	1.89	3.01
PR 锚索 加锚	15	P-15	472.38	1.87	2.97
	30	P-30	472.45	1.87	2.98
	45	P-45	472.85	1.87	2.87
NPR 锚索 加锚	15	N-15	472.30	1.87	2.70
	30	N-30	473.21	1.87	2.80
	45	N-45	472.63	1.88	2.87

本试验设计的 NPR 锚索通过特殊结构实现负泊松比效应,其结构原理图如图 1 所示,由套筒、恒阻体、钢绞线、托盘和螺母组成,各构件具体尺寸详见表 2。锚索受力时锥状的恒阻体沿套筒内壁发生滑移,使套筒发生径向膨胀,锚索呈现“越拉越粗”的状态且不产生“颈缩”效应,则锚固力相似比 C_f 为

$$C_f=C_\gamma C_L^2=3\ 600 \tag{2}$$

式中: C_γ 为体力相似比。

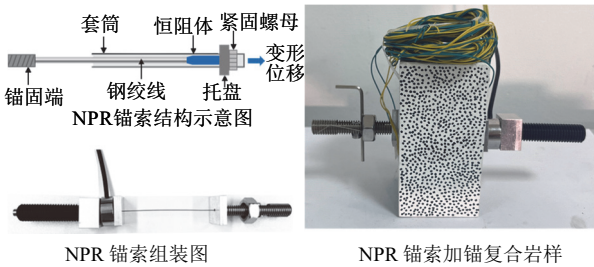


图 1 NPR 锚索原理图与 NPR 加锚复合岩样
Fig.1 Schematic diagram of NPR anchor cable and NPR cable anchored composite rock specimen

表 2 NPR 锚索组成构件具体尺寸

Table 2 Specific dimensions of the components of the NPR cable

部件名称	尺寸/mm
恒阻体	φ5.02
套筒(内/外)	φ5.00/φ7.00
固定托盘	直径 $l=20.00$

试验中采用直径为 0.3 mm、长度为 60 mm 的钢绞线,模拟实际工程中使用的 NPR350 型锚索,

其锚固力约为 350 kN。PR 锚索由钢绞线、托盘和螺母构成, 各个构件的尺寸和材质与 NPR 锚索一致, 为消除破断力差距在加锚方式对比试验中的影响, 选用直径为 0.25 mm 钢绞线组装 PR 锚索。通过 ZQ-990A 电动拉力试验机对 NPR 锚索和 PR 锚索进行拉伸性能测试, 得到结果曲线如图 2 所示。PR 锚索破断力为 100.18 N, 表现出明显的脆性特征, 而 NPR 锚索达到恒阻值后, 形变 2.3~8.0 mm 的范围为恒阻效应段, 锚索受力稳定在 97.4~108.5 N 范围, 充分展现了 NPR 锚索的恒阻特性。现场的锚杆预紧力一般设置为锚索锚固力的 65%~80%, 因此在锚索安装过程中使用螺母施加 70 N 的预紧力并通过应力环监测预紧力增加至预设值。

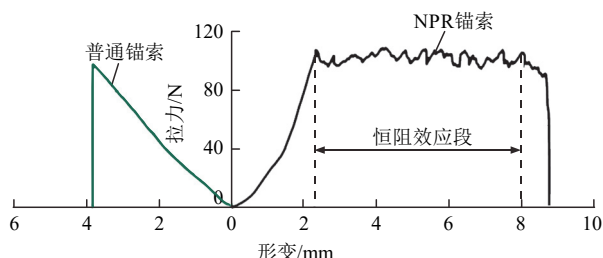


图2 PR 锚索与 NPR 锚索拉伸性能测试结果

Fig.2 Results of tensile properties testing of PR anchor cable and NPR anchor cable

单轴压缩试验采用隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室的 2 000 kN 液压伺服单三轴压缩试验系统作为加载设备, 包含控制主机、测量控制系统和电液伺服加载系统等装置, 如图 3 所示。声

发射监测系统由 Nano-30 传感器、MISTRAS 前置放大器、Micro-IIExpress 数字声发射采集系统和监测主机组成。传感器频响范围为 100~1 000 kHz, 采样频率为 1 M/s; 前置放大器的增益设为 20 dB; 采集系统的采样率为 40 Mps, 声发射阈值设置在 45 dB。DIC 监测设备采用 MatchID-2D/Stereo 全场应变测量与仿真优化分析系统, 包括照明系统、Manta G-505 图像采集系统和图像处理系统。

将试件放置在压力机试验台上, 在试件顶面与底面涂抹适量凡士林以减小端部效应的影响, 采用 4 个声学传感器距试件两侧面顶部与底部中点 15 mm 的位置安装, 涂抹凡士林确保有效耦合, 如图 3 所示。确认装置与参数无误后, 开启电液伺服加载系统与声发射监测系统进行加锚复合岩样单轴压缩试验, 试验采用位移加载控制, 加载速率为 0.2 mm/min, 加载至岩石破坏后停止。

3 复合岩样破坏特征

图 4 为层理倾角影响下无锚、PR 加锚和 NPR 加锚复合岩样的最终破坏形式, 图中灰色实线代表微裂纹, 蓝色和橙色实线分别代表拉伸和剪切裂纹。如图 4(a)~(c)所示, 无锚岩样的破坏形式在 15° 和 30° 倾角时表现为拉剪复合裂纹, W-15 的拉伸裂纹处于岩样表面中心位置, 而 W-30 的拉伸裂纹靠近岩样表面右侧。倾角增加至 45° 时, 无锚岩样沿复合岩石接触面滑动, 几乎没有其他裂纹, 表现为单一剪切破坏。

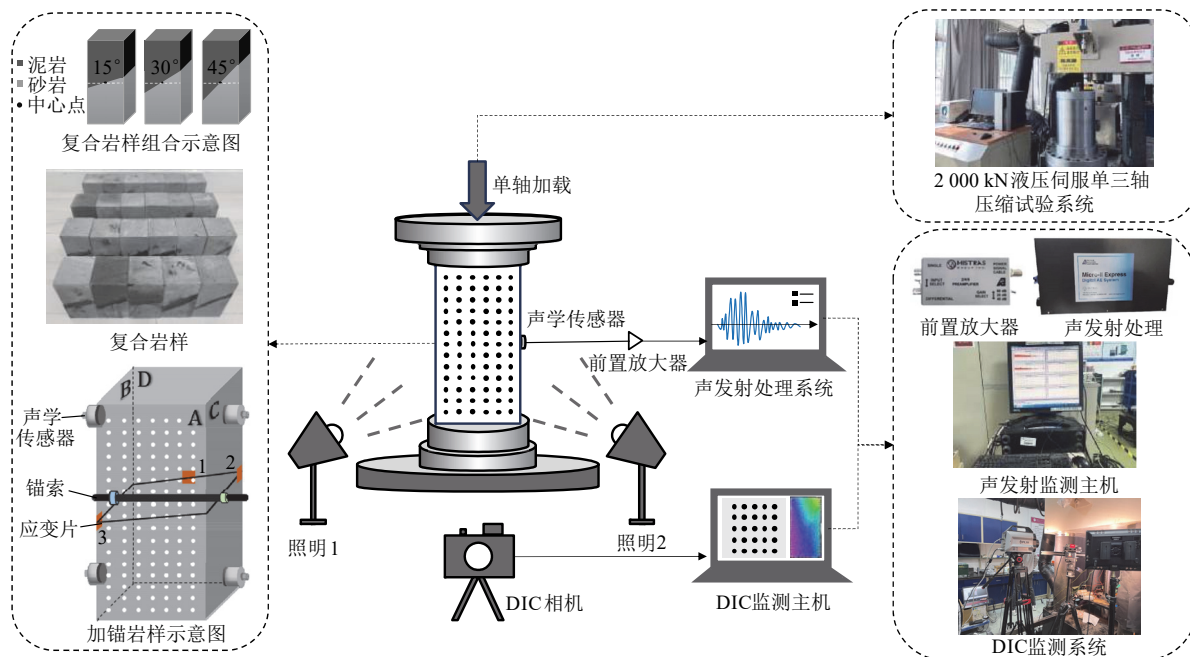


图3 单轴压缩试验系统布置图

Fig.3 Schematic diagram of the uniaxial compression test system

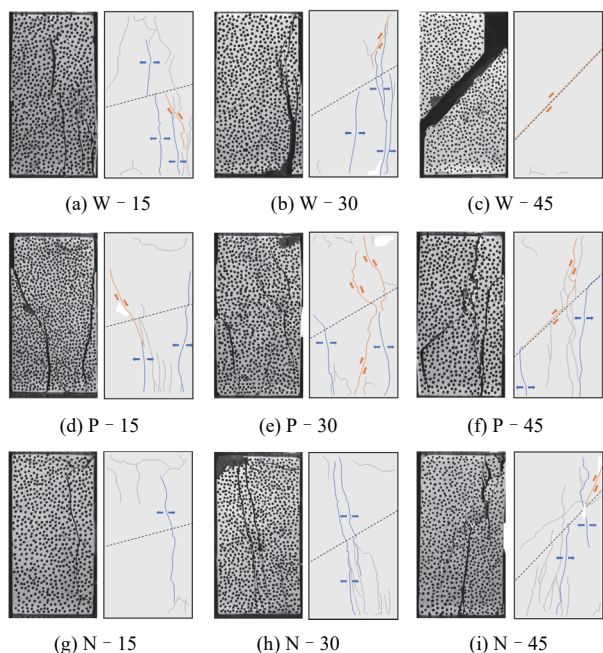


图4 不同锚固类型的砂-泥组合岩样的最终破坏形式
Fig.4 Final failure modes of sandstone-mudstone composite samples with different anchoring types

图4(d)~(f)中, PCAS 在 15° 和 30° 倾角下以拉剪复合裂纹为主, P-30 的剪切裂纹数量高于 P-15, 同时拉伸裂纹数量不变, 总体上看 PCAS 的微裂纹数量比 NCAS 更多。 45° 倾角下 PCAS 表现为拉剪复合破坏, 加载方向的裂纹与接触面倾角的裂纹交错贯通, 由剪切和滑移破坏共同作用, 岩样破碎程度较 NCAS 更高。图4(g)~(i)表明, NCAS 在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 倾角变化下均表现为张拉破坏主导, 微裂纹数量随着倾角增大有所增加, 且主要集中在复合岩样下半部分的泥岩内, 这主要与泥岩的弹性模量小于砂岩有关, 在单轴压缩下更容易达到极限破坏强度。

4 微裂纹演化特征分析

4.1 NPR 加锚复合岩样应力特征

3 组加锚复合岩石的应力-应变曲线如图5所示, 复合岩样的应力-应变曲线分为4个阶段: 压密阶段(阶段I)、弹性阶段(阶段II)、塑性阶段(阶段III)、破坏阶段(阶段IV)。曲线在塑性阶段和破坏阶段差异较大, 塑性阶段应力-时间曲线从线性关系转变为非线性关系, 试样内部裂隙逐渐扩展和贯通, 试件的体积由压缩状态逐渐转变为扩容状态。无锚和 PCAS 的曲线在达到峰值应力后快速下降, 而 NCAS 曲线的峰后特性表现出恒阻的特征, 在达到应力峰值后, 随着应变值的增大, 应力在峰值区间

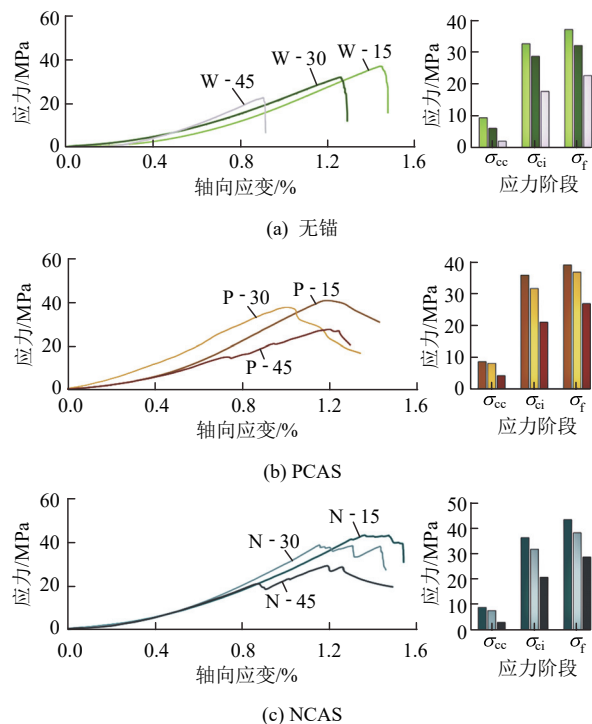


图5 不同锚固类型的砂-泥组合岩样的应力-应变曲线和不同应力阶段的应力峰值柱状图

Fig.5 Stress-strain curves and peak stress histograms at different stress stages of sandstone-mudstone composite samples with various anchoring types

内小幅度波动, 如图5(c)所示。这一现象的原因是恒阻体随外力作用在套筒内滑动时, 恒阻体和套筒之间的静摩擦转变为滑动摩擦。

随着层理倾角的增长($15^\circ \sim 45^\circ$), 2 种加锚形式的复合岩石的抗压强度降低, PCAS 抗压强度最大降幅 32.65%, NCAS 抗压强度最大降幅达到 32.64%; 层理倾角从 $15^\circ \sim 45^\circ$, NCAS 比 PCAS 的峰值强度提升了 3.06%~6.20%。当进入破坏阶段后, 30° 和 45° 倾角的 NCAS 的应力曲线回弹现象非常明显, 说明试件在残余强度阶段仍具有一定的承载力。

在层理倾角的变化下, NCAS 的峰值强度随倾角增加而降低, PCAS 也呈现出相似的特点, 如图6所示。用线性关系拟合单轴荷载作用下加锚复合岩样平均强度与层理倾角的关系:

$$\sigma(\theta) = k \cos(2\theta) + b \quad (3)$$

式中: $\sigma(\theta)$ 为加锚复合岩石的单轴抗压强度, θ 为层理倾角, k 和 b 均为拟合系数。

经计算, NCAS 的拟合系数 $k_N = 16.56$, $b_N = 29.48$; PCAS 的拟合系数 $k_P = 15.62$, $b_P = 28.08$; 无锚岩样的拟合系数 $k_W = 16.53$, $b_W = 22.52$ 。

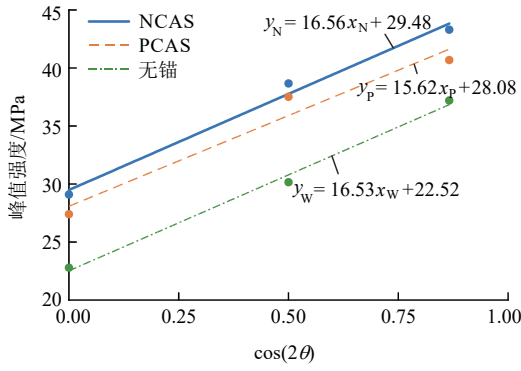


图6 不同锚固类型的砂-泥组合岩样的峰值强度与层理倾角的关系

Fig.6 Relationship between peak strength and bedding plane inclination angle of sandstone-mudstone composite samples with different anchoring types

通过上述分析,认为层理倾角的增加($15^\circ \sim 45^\circ$)降低了加锚复合岩样的抗压强度;并且从 45° 开始, NCAS 的应力曲线在弹性阶段表现出双峰特性;相同的层理倾角下, NCAS 比 PCAS 表现出更高的抗压强度。

4.2 位移场特征分布

数字图像相关方法的分析中,考虑两幅图像之间的相关性,将 $t = 0$ 时刻的图像定义为参考图像 F ,将 $t = t_1$ 时刻的图像定义为 G , F 和 G 划分出相应的子集(像素区域)分别称为参考子集 f 和目标子集 g ,相关性考虑如何将参考子集经过变形和位移与目标子集相匹配^[33],如图7所示。

假设参考子集 f 的中心点 $\mathbf{x}^0 = [x^0 \ y^0]^T$ 距离目标子集 g 中心点 $\mathbf{x}^d = [x^d \ y^d]^T$ 的位移是 (u, v) ,则参考子集 f 中第 i 个像素点 $\mathbf{x}_i = [x_i \ y_i]^T$ 的位置可以由 $\mathbf{x}^0$ 和 $\mathbf{x}^0$ 与 $\mathbf{x}_i$ 之间的距离 $\Delta \mathbf{x}_i$ 表示:

$$\mathbf{x}_i = \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{x}^0 = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x^0 \\ y^0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此对应目标子集 g 中第 i 个像素点 $\mathbf{x}'_i = [x'_i \ y'_i]^T$ 可以由 $\mathbf{x}^0$ 和 $\mathbf{x}^0$ 与 $\mathbf{x}'_i$ 之间的距离 $\Delta \mathbf{x}'_i$ 表示:

$$\mathbf{x}'_i = \Delta \mathbf{x}'_i + \mathbf{x}^0 = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x'_i \\ \Delta y'_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x^0 \\ y^0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于 $\mathbf{x}^d$ 是未知的,因此 $\Delta \mathbf{x}'_i$ 的计算由调整 $\Delta \mathbf{x}_i$ 的函数 W 和由形状函数参数 P 量化的位移和变形决定:

$$\Delta \mathbf{x}'_i = W(\Delta \mathbf{x}_i, P) \quad (6)$$

由于图像的离散性,需要采用插值法构建参考子集 f 和目标子集 g 的像素点 f_i 和 g_i :

$$f_i = F(\mathbf{x}^0 + \Delta \mathbf{x}_i) \quad (7)$$

$$g_i = G[\mathbf{x}^0 + W(\Delta \mathbf{x}_i, P)] \quad (8)$$

f 和 g 之间的相似性通过相关准则来量化。相关性的目的是找到定义与参考子集密切匹配的被目标子集的形状函数参数 P ,并计算最终整个 $t = t_1$ 时刻目标图像的位移场图像,一般以色域图像展示。

声发射事件数用于统计单位时间内产生声发射震荡波的材料局部变化,声发射试件速率通常用于衡量声发射事件的总量和频度,反映了声发射活动强弱程度以及岩石内部裂隙演化的过程。

本节中采用 DIC 方法对不同层理倾角的 NCAS 和 PCAS 的单轴压缩中的位移场进行了分析,探讨了不同应力区间位移场与微裂纹演化的关系,利用声发射事件速率对位移场结果进行了分析,如图8所示,声发射时间速率由每秒内发生的事件数计

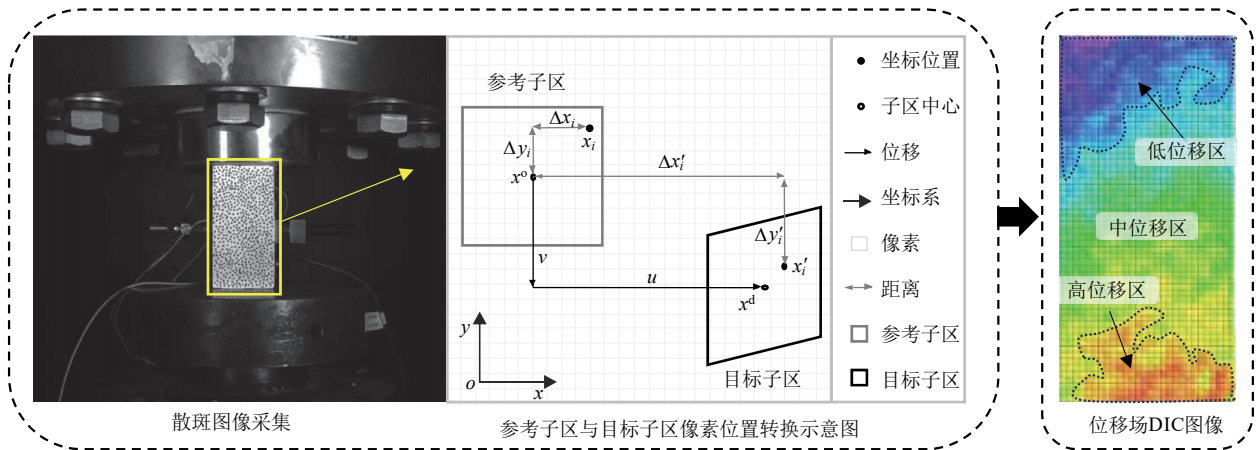
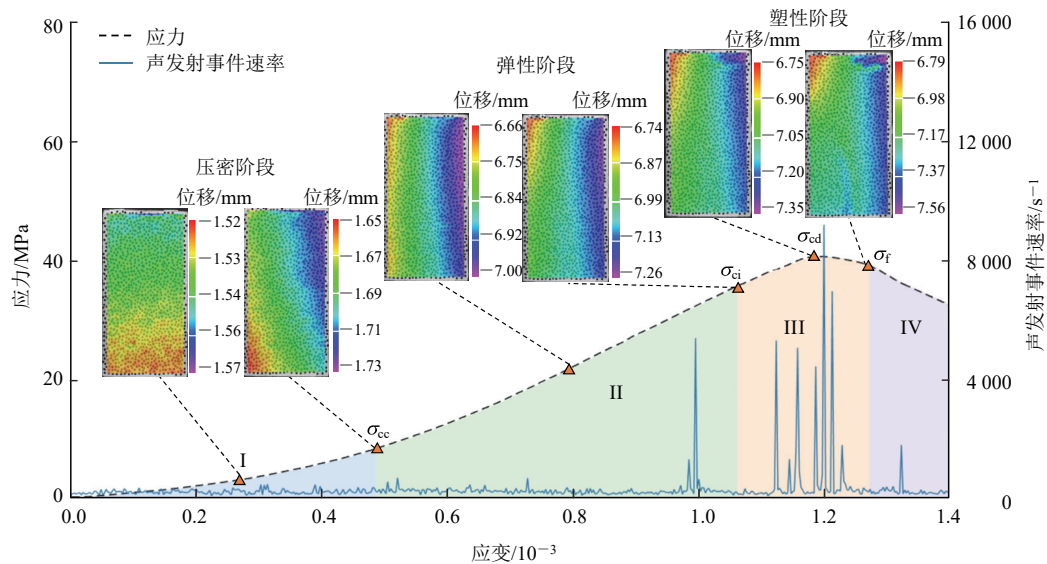
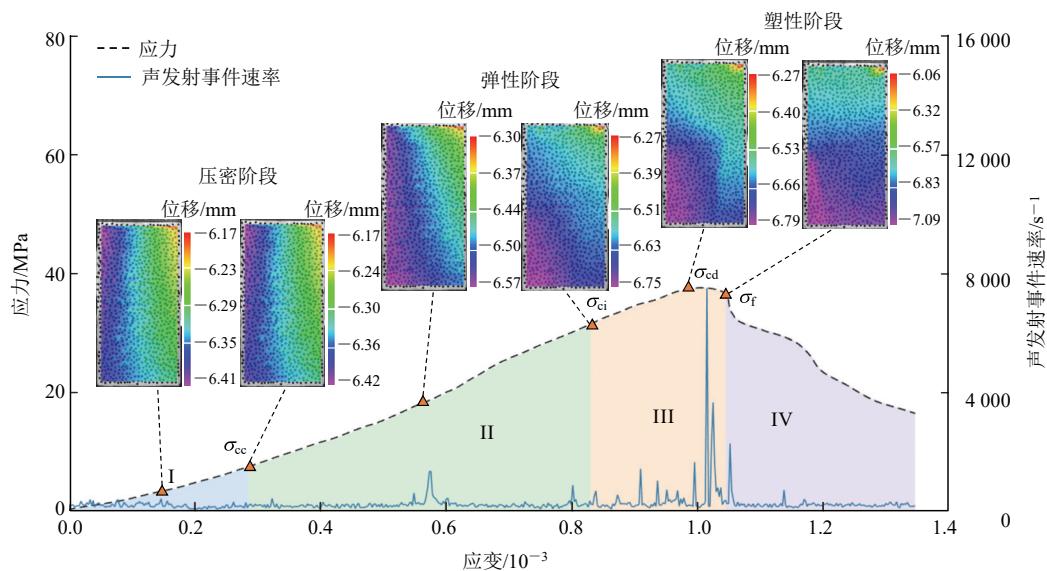


图7 散斑图像采用 DIC 方法计算岩样表面位移场

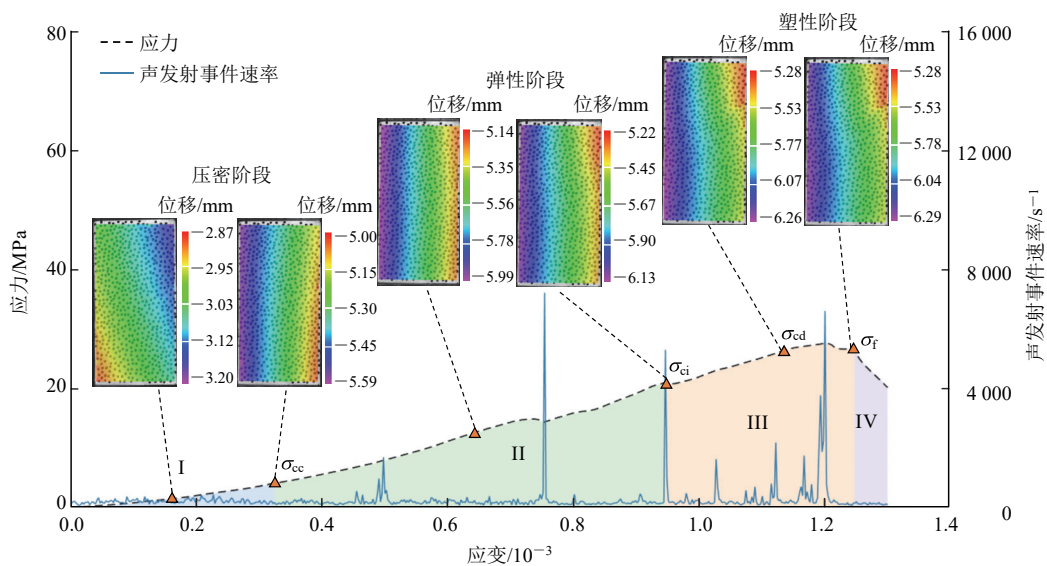
Fig.7 DIC-derived rock specimen surface displacement field from the speckle patterns



(a) P - 15



(b) P - 30



(c) P - 45

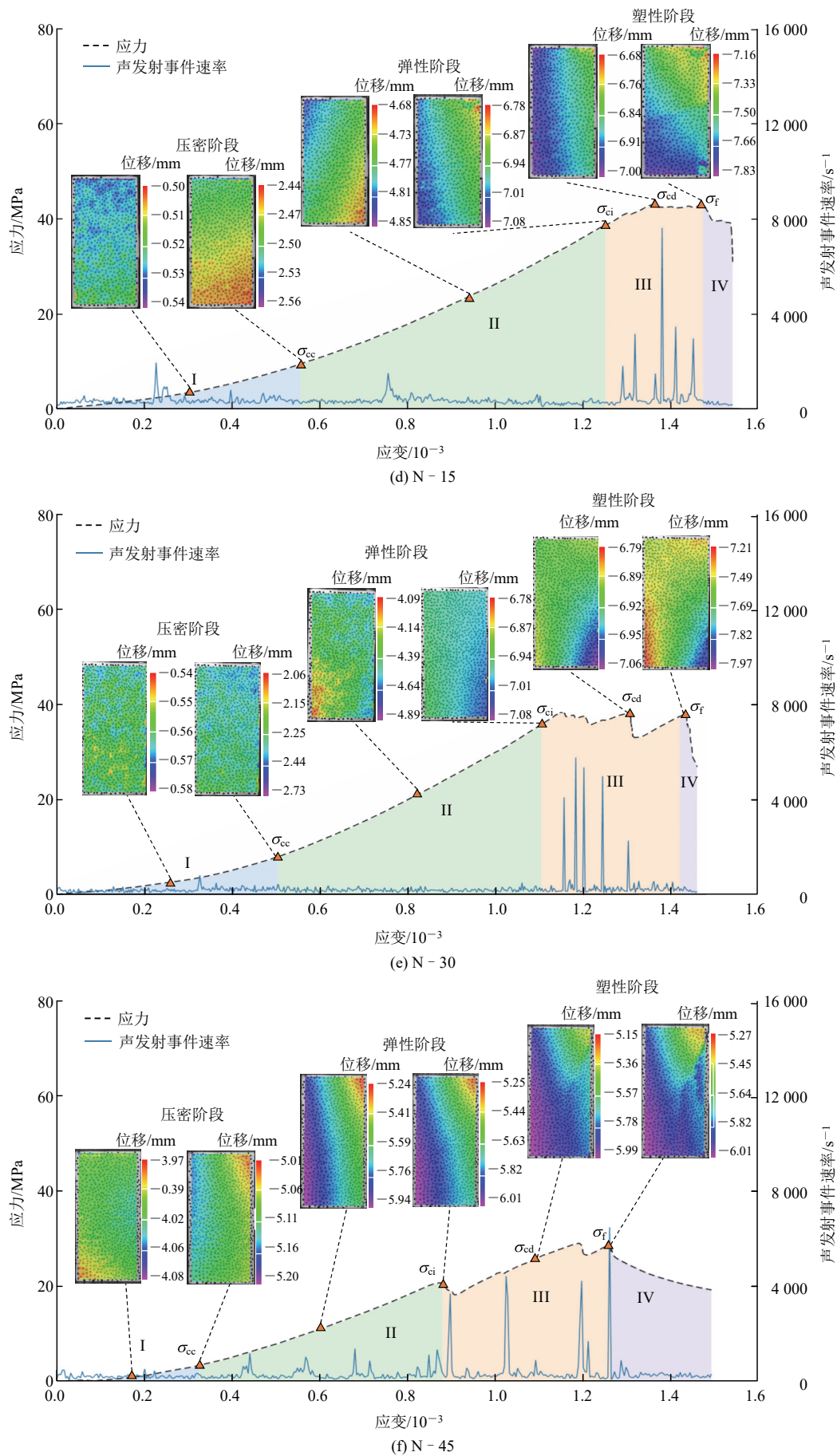


图8 不同锚固类型的砂-泥组合岩样的声发射事件率与应变的关系和不同应力阶段的 DIC 位移场

Fig.8 AE event rate vs. strain and stage-dependent DIC displacement fields in anchored sandstone-mudstone composites

算, 在应力区间的中点和特征应力点采样位移场的演化状态, 由于 DIC 方法的限制, 无法对已经出现的裂纹表面进行计算, 因此破坏阶段无法采样, 图像的颜色域代表了最大到最小位移区域, 由高位移区(75%~100%)、中位移区(25%~75%)和低位移区(0%~25%)组成。

在 $0 \sim \sigma_{cc}$ 压密阶段, 复合岩样表面以中低位移区为主, 由岩石内部初始裂纹的闭合引起。随着荷载增加, 试件两端的高位移区的占比逐渐增大, 声发射事件速率处于很低的水平。通过观察发现 NCAS 存在较多的初始中低位移区, 后续出现占比比较低的高位移区分布于试件端部。而 PCAS 的高位移区占比逐步增加并分布于试件一侧。

在 $\sigma_{cc} \sim \sigma_{ci}$ 弹性阶段, 观察图 8(a)~(b)和(d)~(e)发现, 倾角 15° 和 30° 的复合岩样的中位移区占比较高, 裂纹处于稳定扩展阶段, 声发射率仍维持在较低水平, 偶有 1~2 个较高波峰, 表示新裂纹的产生与合并。

倾角 45° 时复合岩样表面高位移区占比较高(见图 8(c)和(f)), PCAS 的高位移区占比相较 NCAS 更高, 声发射率出现 3~5 个峰值, 表明试样在压缩过程中出现层理间的小幅度滑移, 且 N-45 的声发射事件率峰值增幅比 P-45 更低, 说明 NPR 锚索相比 PR 锚索对复合岩样的控制作用更强。

在 $\sigma_{ci} \sim \sigma_f$ 塑性阶段, 倾角 15° 的复合岩样的中低位移占比较大, N-15 几乎没有出现高位移区, P-15 的高位移区出现在端部一侧, 声发射事件率出现 6~7 个峰值, 说明此时裂纹不稳定扩展, 多个微裂纹延伸贯通形成宏观裂纹。

倾角 30° 下的复合岩样高位移区占比相对 15° 倾角有所提升, N-30 表面的中低位移占比较大, 声发射事件率的几个峰值幅值相近, 并未出现大幅变动。这与 NPR 锚索本身的力学特性有关。与 PR 锚索达到破断力即失效的特征不同, NPR 锚索在达到峰值应力后仍能通过特殊锚索结构维持锚固效应, 累计振铃计数曲线与应力-时间曲线特征对应, 在峰后阶段曲线一直维持在峰值区间震荡。P-30 表面也出现了位于中下部分的矩形位移分区, 声发射事件率出现了明显的波峰, 破坏前夕速率大幅增加后突然降低几乎至 0。

在倾角 45° 下, 复合岩样的中高位移区占比较大, N-45 表面的中高位移区呈现出“V”型结构, 声发射事件率出现 3~4 个峰值, 各个波峰之间间隔较大, 说明 NPR 锚索在阻止复合岩样沿层理结构面

滑移的过程中起到了重要作用。而 P-45 的端部出现了矩形的高位移区, 当应力达到峰值时声发射事件率只表现出一个最高峰值, 说明 PR 锚索对复合岩样变形的约束作用不及 NPR 锚索。上述位移场和声发射事件率分析表明, 高位移区与微裂纹演化存在相关性。

为了进一步说明 NPR 锚索的恒阻效应, NCAS 与 PCAS 的 DIC 水平位移场如图 9 所示, 由于 NPR 锚索的恒阻效应出现在峰值应力之后, 因此在图 9 中展示 PCAS 与 NCAS 的塑性阶段 DIC 水平位移场。对比 N-15 与 P-15 的水平位移演化过程发现, N-15 试样的位移范围均为负值, 表明试样整体向 x 轴负方向移动但变形加剧, 出现带状集中导致位移不连续。而 P-15 的位移范围呈现正负交替, 表明试样表面存在双向位移, 正值集中于岩样表面右下方, 反映了倾斜剪切破裂面的演化趋势。而 N-30 的水平位移表现为岩样表面上下区域的正负交替, 其中最大正值区域集中在右下部分, 反映了竖向张拉裂纹的形成。

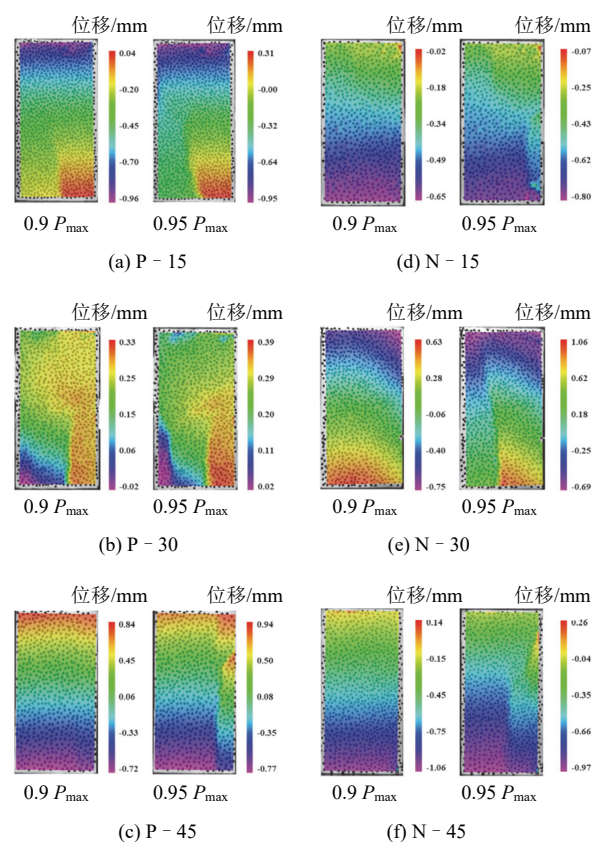


图 9 不同锚固类型的砂-泥组合岩样在塑性阶段的水平 DIC 位移场

Fig.9 The horizontal DIC displacement field of the anchored composite rock specimen

观察 P-30 试样表面的水平位移场分布, 正负区域分别分布在左半和右半区域, 表明试样左右下侧的位移带发展为倾斜剪切裂纹和竖向张拉裂纹。N-45 的水平位移范围正负交替出现在岩样表面右上方, 表明该分界线附近出现了张拉裂纹。P-45 试样右侧的位移分界带左右均为正值, 反映了该区域产生了剪切主导变形, 发展为宏观剪切破裂面。综上所述, PCAS 稳定存在正负位移分区, 最终加锚系统以剪切破坏或拉剪复合破坏为主导而失稳。而 NCAS 在单轴压缩下的变形从均匀压缩转向局部带状集中, 垂直带为关键损伤前兆, 最终发展为以拉伸破坏为主导的裂纹形式, 或出现局部微裂纹集中的情况, 反映了 NPR 锚索对加锚试样的抗剪作用, 且 NCAS 的水平位移范围均小于 PCAS, 侧面说明了 NPR 锚索在水平方向上对加锚试样的限制作用。

5 微裂纹演化的尺度和模式

5.1 微裂纹拉剪特性分析

岩石的破坏总伴随着声发射能量的产生, RA - AF 值常用于判断材料发生破坏时拉伸裂纹和剪切裂纹的占比, AF 为平均频率, RA 为上升时间与幅值的比值。当一点具有高 AF 值和低 RA 值时, 认为该处发生了拉伸破坏, 反之则对应剪切破坏, RA - AF 值的原理图如图 10 所示。

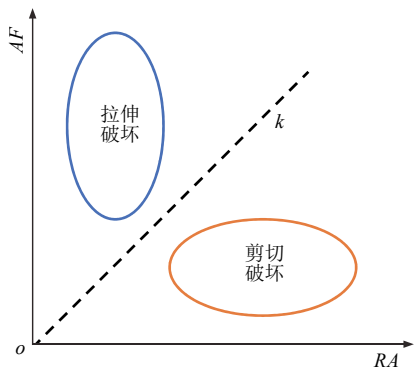


图 10 RA - AF 值原理图

Fig.10 The schematic diagram of RA - AF value

为进一步研究 PR 加锚试样和 NPR 加锚试样的微裂纹拉剪特性区别, 2 种加锚形式的 RA - AF 分布如图 11 所示, 分别展示了 4 个应力阶段内产生的声发射信号的归一化 RA - AF 值。

通过观察发现, 试件 N-15 和 N-30 从压密阶段到塑性阶段的剪切裂纹占比维持在 19%~23%, 而试件 P-15 和 P-30 的剪切裂纹占比处于区间 17%~27%, 可见 NPR 加锚试件的剪切裂纹占比低

于 PR 加锚试件 2%~4%。试件 P-15 和 P-30 的破坏阶段的剪切裂纹占比增长到 30%~34%, 产生大量剪切裂纹, 而试件 N-15 和 N-30 的破坏阶段的剪切裂纹占比分别为 23%和 27%, 从压密阶段进入塑性阶段, RA - AF 值变化不大, 这体现了 NPR 锚索对加锚试样的控制效果, 使得加锚试样的剪切裂纹占比稳定在 20%左右。

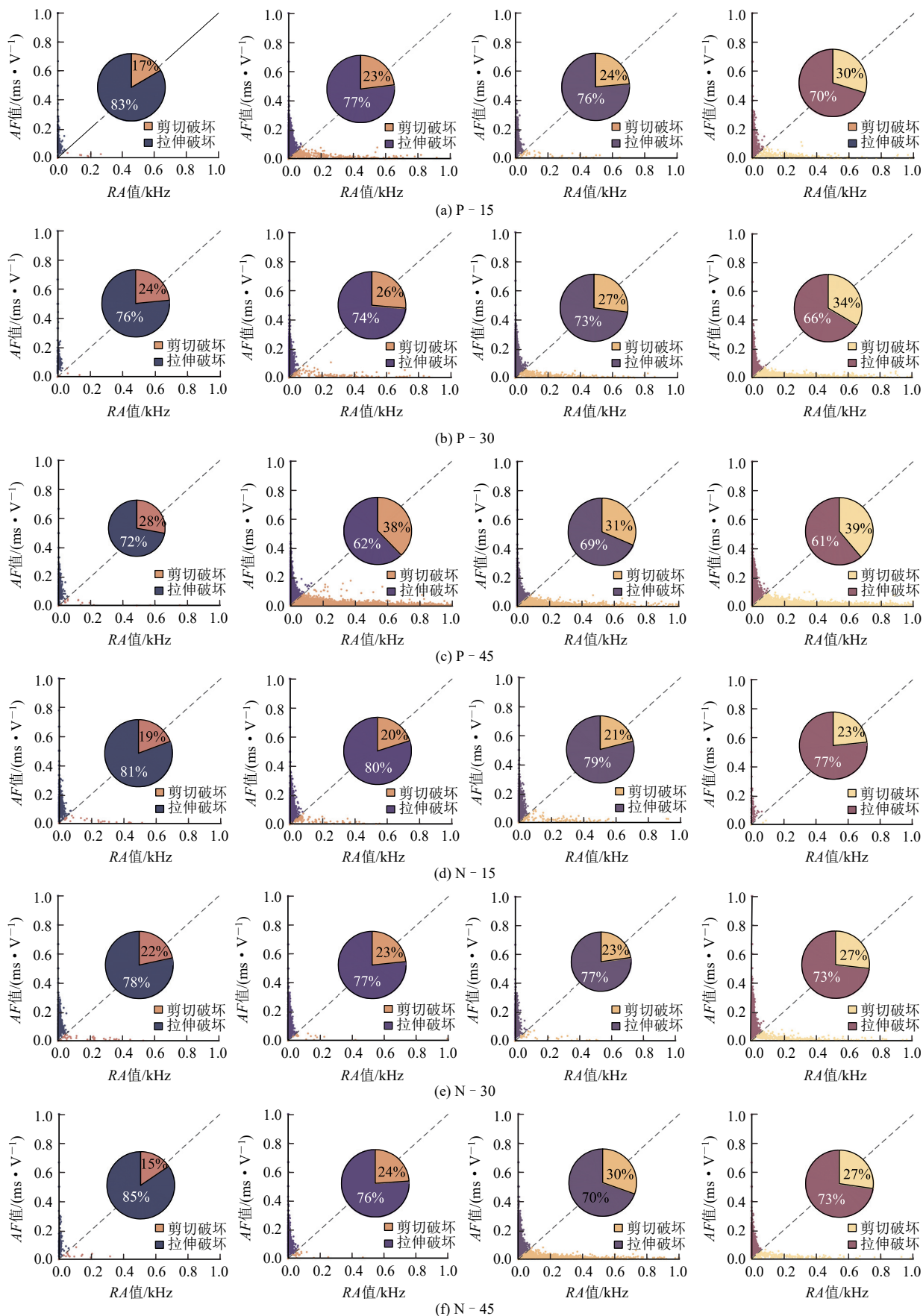
对比 45° 倾角下的 PCAS 与 NCAS 的表现, N-45 在压密阶段到塑性阶段的剪切裂纹占比从 15%增加至 30%, 但在破坏阶段降低至 27%, 而 P-45 从塑性阶段到破坏阶段的剪切裂纹占比从 31%增长到 39%, 可以看出 P-45 的抗剪强度相对较低, 试样更容易受到剪切破坏。为进一步研究 2 种加锚形式下不同层理倾角岩样的破坏特征, PCAS 与 NCAS 的 RA 和 AF 值与应力阶段关系如图 12 所示。

对比 N-15, N-30, N-45 试样的 RA 值变化趋势, 发现整个加载过程中 N-15 和 N-30 试样的剪切裂纹占比的增长幅度为 4%~5%, N-45 试样的增长幅度为 12%。说明 NCAS 的拉-剪裂纹比例对 15°~30° 的倾角变化不敏感, 当层理倾角增加至 45°, NCAS 产生剪切裂纹的比例增加, 但其比例仍低于 PCAS, 在破坏阶段 NCAS 仍具有一定的抗剪能力, 可以看出 NPR 锚索的锚固效果优于 PR 锚索。

5.2 微裂纹演化的尺度特征

声发射时域信号经快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)转化为频域信号后, 峰值振幅对应的频率即峰值频率, 也称主频。在岩石的声发射行为的监测中, 峰值频率即最大能谱点对应的频率, 往往反映了声发射活动最活跃的频率区间。研究表明, 声发射信号频率分量反映了破裂尺度的大小, 低频分量对应大尺度裂纹, 高频分量对应小尺度裂纹, 复合加锚岩石的单轴压缩及破坏过程中的声发射峰值频率范围为 0~250 kHz, 因此将峰值频率区间分为低频段(0~60 kHz)、中低频段(60~105 kHz)、中高频段(105~170 kHz)、高频段(170~250 kHz)。

图 13 展示了 PCAS 与 NCAS 的峰值频率在各频段的占比。试验过程中的 2 个带状峰值频率密集区分别为中低频段和高频段。NCAS 的主频在高频段内波形数量占比最高, 占比在 63%以上, 并且 3 组倾角的主频分布趋势趋于一致, 随着倾角的增加, 波形数量在中低频段的占比小幅增长, 而高频段内波形数量占比相应下降, 部分小尺度破裂相互贯通连接形成大尺度裂纹, 导致了最终加锚岩样失稳破坏。

图 11 不同锚固类型的砂-泥组合岩样的归一化 $RA-AF$ 值与应力阶段的关系Fig.11 Relationship between normalized $RA-AF$ values and stress stages in sandstone-mudstone composite samples with different anchoring types

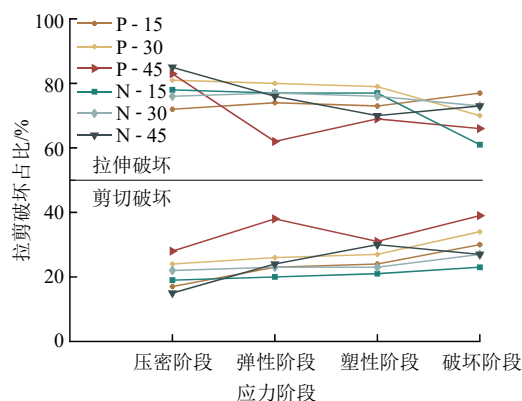


图 12 不同锚固类型的砂-泥组合岩样的拉剪破坏占比与应力阶段的关系

Fig.12 Relationship between T-S failure with stress stages of sandstone-mudstone composite samples with different anchoring types

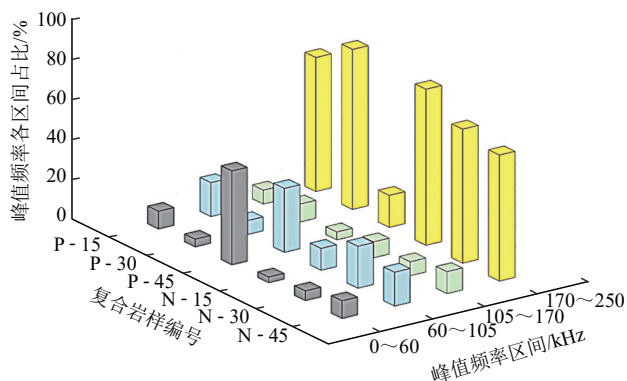


图 13 不同锚固类型的砂-泥组合岩样的峰值频率在各频段占比

Fig.13 Peak frequency proportion of sandstone-mudstone composite samples in each band with different anchoring types

当 PCAS 的层理倾角由 15° 增加至 30° ，波形数量在中低频段的占比降低、高频段的占比增加，与 NCAS 的趋势相反，说明倾角的增加引起了试样内部微裂纹数量的增加，试样的最终破坏是由于大量小尺度破裂的聚集。倾角 45° 时波形数量反而在低频段内占比最高，约占总数的 79%，此时高频区间的波形数量只占 16%，大尺度裂纹主导了加锚试件的最终破坏失稳，说明倾角增加至 45° 后，PR 锚索对复合岩石试件的锚固作用无法控制试样的变形。

比较 PCAS 与 NCAS 的波形数量的变化趋势，发现二者波形数量变化趋势恰好相反，说明 PCAS 在发生破坏时破坏瞬间时间短暂，小破裂之间没有相互贯通形成大破裂，PR 锚索在达到破断力后立刻失效，而 NCAS 的破坏过程相对缓慢，小破裂产生裂纹相互贯通形成大裂纹，NPR 锚索在达到破断力

后持续产生变形而吸能，锚固作用延续到锚索的最大变形量才失效。

6 结 论

针对复合倾斜顶板的支护问题，深入探究单轴压缩下层理倾角为 15° ， 30° 和 45° 的 NPR 锚索锚固、PR 锚索锚固的砂岩-泥岩复合岩石的力学、声发射和 DIC 位移场特性，重点分析了声发射事件率、 $RA-AF$ 值及峰值频率的分布，得出以下结论：

(1) 2 种加锚岩样的抗压强度均与层理倾角成反比。随着倾角的增加，加锚岩样的抗压强度降低，破坏机制由 15° 倾角时小尺度破裂的聚集逐渐转变为 45° 倾角时界面滑移破坏。

(2) PR 锚索加锚岩样的剪切裂纹占比与倾角成正比，在 45° 倾角下 PR 加锚试样的抗剪强度低、更易受到剪切破坏。NPR 锚索加锚试样的拉剪裂纹占比对层理倾角的变化不敏感，抗剪强度高，NPR 锚索加锚试样在 45° 倾角下未出现滑移破坏倾向。

(3) UCT 结果表明，对于相同的层理倾角，NPR 锚索加锚试件的峰值强度比 PR 锚索加锚试件高 3.06%~6.20%。随着应变增加，NPR 加锚试件的峰后曲线维持在峰值区间小幅波动，具有恒阻特性。

(4) 在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 倾角时，PR 锚索加锚试样的高频段占比增加，大量小尺度破裂聚集引起了岩样的最终失稳破坏。 45° 倾角时，PR 锚索加锚岩样的破坏形式表现为砂-泥岩滑移失稳导致的整个系统破坏。NPR 锚索加锚试件的高频段比例对倾角的变化不敏感，达到破断力后 NPR 锚索持续吸能直到最大变形量。

7 展 望

本文系统研究了不同倾角条件下 NPR 锚索加锚层状复合岩体的力学响应与破坏特征，结果表明该支护形式在裂纹扩展抑制、抗剪性能提升及峰后承载保持方面具有显著优势。研究成果对 NPR 锚索在工程现场的应用具有重要指导意义，具体建议如下：首先，针对层状顶板推荐优先采用具备恒阻性能的 NPR 锚索，以增强软弱结构面的强度与稳定性；其次，应结合层理倾角优化 NPR 锚索的预紧力和托盘结构配置，低倾角岩层宜采用高预紧力延缓

裂纹发展,高倾角岩层宜配合增强托盘以提升抗剪约束能力。未来可进一步开展 NPR 锚索在多岩性组合、动载扰动及循环加载等复杂工况下的适用性研究,为其在深部工程支护中的系统化应用与标准化推广奠定基础。

参考文献(References):

- [1] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 854 - 2 858.(HE Manchao. Concept system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 854 - 2 858.(in Chinese))
- [2] 何满潮, 马新根, 牛福龙, 等. 中厚煤层复合顶板快速无煤柱自成巷适应性研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2 641 - 2 654.(HE Manchao, MA Xingen, NIU Fulong, et al. Adaptability research and application of rapid gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure releasing with composite roof and medium thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2 641 - 2 654.(in Chinese))
- [3] 何满潮, 马新根, 王 炯, 等. 中厚煤层复合顶板顶卸压自动成巷工作面矿压显现特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2 425 - 2 434.(HE Manchao, MA Xingen, WANG Jiong, et al. Feature analysis of working face strata pressure with roof cutting pressure releasing in medium-thick seam and compound roof condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2 425 - 2 434.(in Chinese))
- [4] 何满潮, 高玉兵, 杨 军, 等. 无煤柱自成巷聚能切缝技术及其对围岩应力演化的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1 314 - 1 325.(HE Manchao, GAO Yubing, YANG Jun, et al. An energy-gathered roof cutting technique in no-pillar mining and its impact on stress variation in surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1 314 - 1 325.(in Chinese))
- [5] 殷鹏飞. 层状复合岩石试样力学特性单轴压缩试验与颗粒流模拟研究[硕士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.(YIN Pengfei. Experimental and particle flow simulation on mechanical properties of layered composite rock under uniaxial compression[M. S. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2016.(in Chinese))
- [6] 肖长富, 林 新, 吴 刚, 等. 层间粘结强度对复合岩石压缩力学性能特性的影响[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1988, 11(1): 120 - 126.(XIAO Changfu, LIN Xin, WU Gang, et al. The effect of the bond strength between layers on compressive mechanical properties of the composite rock[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science, 1988, 11(1): 120 - 126.(in Chinese))
- [7] 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): 1 747 - 1 757.(YANG Renshu, LI Weiyu, 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): 1 747 - 1 757.(in Chinese))
- [8] 周 辉, 宋 明, 张传庆, 等. 水平层状复合岩体变形破坏特征的围压效应研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 465 - 473.(ZHOU Hui, SONG Ming, ZHANG Chuanqing, et al. Effect of confining pressure on mechanical properties of horizontal layered composite rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 465 - 473.(in Chinese))
- [9] TAN Y L, MA Q, LIU X S, et al. Failure prediction from crack evolution and acoustic emission characteristics of coal-rock sandwich composite samples under uniaxial compression[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(5): 200.
- [10] 腾俊洋, 唐建新, 王进博, 等. 层状复合岩体损伤演化规律及分形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增 1): 3 263 - 3 278.(TENG Junyang, TANG Jianxin, WANG Jinbo, et al. The evolution law of the damage of bedded composite rock and its fractal characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Supp.1): 3 263 - 3 278.(in Chinese))
- [11] ABBAS H A, MOHAMED Z, ABDUL KUDUS S. Deformation behaviour, crack initiation and crack damage of weathered composite sandstone-shale by using the ultrasonic wave and the acoustic emission under uniaxial compressive stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 170: 105497.
- [12] 耿志伟, 苏占东, 王 磊, 等. 高径比对砂岩单轴压缩声发射特性的影响研究[J]. 实验力学, 2021, 36(3): 250 - 258.(GENG Zhiwei, SU Zhandong, WANG Lei, et al. Influence of height-to-diameter ratio on acoustic emission characteristics of sandstone under uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(3): 250 - 258.(in Chinese))
- [13] 宋战平, 刘洪珂, 郑 方, 等. 考虑层理倾角的硬质砂岩力学行为及破裂响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(12): 167 - 175.(SONG Zhanping, LIU Hongke, ZHENG Fang, et al. Mechanical behavior and fracture response characteristics of hard sandstones considering bedding dip angles[J]. Coal Geology and Exploration, 2023, 51(12): 167 - 175.(in Chinese))
- [14] 王聚贤, 梁 鹏, 张艳博, 等. 基于声发射 $RA-AF$ 值与 kneedle 算法的岩石拉剪破裂分类研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增 1): 3 267 - 3 279.(WANG Juxian, LIANG Peng, ZHANG Yanbo, et al. Research on classification of rock tensile-shear fracture based on acoustic emission $RA-AF$ values and kneedle algorithm[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Supp.1): 3 267 - 3 279.(in Chinese))
- [15] 张艳博, 于光远, 田宝柱, 等. 花岗岩巷道岩爆声发射信号主频特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1 258 - 1 266.(ZHANG Yanbo, YU Guangyuan, TIAN Baozhu, et al. Experimental study of

- acoustic emission signal dominant-frequency characteristics of rockburst in a granite tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(5): 1 258 – 1 266.(in Chinese))
- [16] MUNOZ H, TAHERI A, CHANDAE K. Pre-peak and post-peak rock strain characteristics during uniaxial compression by 3D digital image correlation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(7): 2 541 – 2 554.
- [17] 傅帅阳, 李海波, 李晓锋. 基于 DIC 方法与声发射的花岗岩断裂过程区范围研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(12): 2 497 – 2 508. (FU Shuaiyang, LI Haibo, LI Xiaofeng. Research on the range of fracture process zone of granite based on DIC and acoustic emission[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(12): 2 497 – 2 508.(in Chinese))
- [18] 李元海, 靖洪文, 刘 刚, 等. 数字照相量测在岩石隧道模型试验中的应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(8): 1 684 – 1 690. (LI Yuanhai, JING Hongwen, LIU Gang, et al. Study on application of digital close range photogrammetry to model test of tunnel in jointed rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1 684 – 1 690.(in Chinese))
- [19] 王天佐, 王春力, 薛 飞, 等. 不同循环加卸载路径下红砂岩声发射与应变场演化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(增 1): 2 881 – 2 891.(WANG Tianzuo, WANG Chunli, XUE Fei, et al. Study on acoustic emission and strain field evolution of red sandstone under different cyclic loading and unloading paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(Supp.1): 2 881 – 2 891.(in Chinese))
- [20] QI X Y, YANG Z, WANG S W, et al. Mechanical damage test and model study of layered composite rock based on acoustic emission and DIC characteristics[J]. *Shock and Vibration*, 2022, <https://doi.org/10.1155/2022/6568588>.
- [21] XIONG B L, SUN J, ZHAO Y M, et al. Quantitative identification of cracks in jointed layered rock specimens under uniaxial compression[J]. *Sustainability*, 2023, 15(9): 7 073.
- [22] 李 恒, 杨圣奇, 孙博文, 等. 双裂隙复合岩层单轴压缩力学性质及损伤机理离散元模拟[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2023, 54(10): 4 000 – 4 014.(LI Heng, YANG Shengqi, SUN Bowen, et al. Discrete element simulation of mechanical properties and damage mechanism of composite rock containing two fissures under uniaxial compression[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2023, 54(10): 4 000 – 4 014.(in Chinese))
- [23] JING H W, YANG S Q, ZHANG M L, et al. An experimental study on anchorage strength and deformation behavior of large-scale jointed rock mass[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 43: 184 – 197.
- [24] 葛修润, 刘建武. 加锚节理面抗剪性能研究[J]. *岩土工程学报*, 1988, 10(1): 8 – 19.(GE Xiurun, LIU Jianwu. Study on the shear resistance behavior of bolted rock joints[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 10(1): 8 – 19.(in Chinese))
- [25] LU Y Y, YU Y, FENG G L, et al. Experimental study on dynamic mechanical response and crack control mechanism of anchored layered sandstone by DIC technology[J]. *Measurement*, 2025, 250: 117078.
- [26] LI M X, TANG D W, QUAN Q Q, et al. Experimental investigation on drilling anchorage for asteroid exploration based on digital image correlation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 170: 105522.
- [27] HE M C, GONG W L, WANG J, et al. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 67: 29 – 42.
- [28] 孙晓明, 张 勇, 何满潮, 等. 深部井巷工程高预应力 NPR 耦合支护技术[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(1): 50 – 65.(SUN Xiaoming, ZHANG Yong, HE Manchao, et al. Research of high pre-stress NPR support technology in deep shaft roadway engineering[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(1): 50 – 65.(in Chinese))
- [29] WANG J, LIU P, WU C Z, et al. Mechanical behavior of soft rock roadway reinforced with NPR cables: A physical model test and case study[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 138: 105203.
- [30] WANG J, LIU P, HE M C, et al. Mechanical behaviour of a deep soft rock large deformation roadway supported by NPR bolts: a case study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(12): 8 851 – 8 867.
- [31] SUN X M, CUI L, ZHANG Y, et al. Strength characteristics of rock anchored by NPR bolt with different preloads[J]. *Journal of Mountain Science*, 2023, 20(3): 834 – 844.
- [32] MIAO C Y, WANG L, CUI L, et al. Experimental study on the mechanical characteristics of NPR anchored rock under kilometer-deep buried high geostress conditions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2025, 62: 1 – 15.
- [33] ATKINSON D, BECKER T. A 117 Line 2D Digital Image Correlation Code Written in MATLAB[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 2 906.