

DOI: 10.11779/CJGE20230241

加载速率影响下板裂化脆性岩石失稳破坏试验研究

金爱兵^{1,2}, 陈 龙^{1,2,3}, 吴顺川^{*1,2,4}, 郭 沛^{1,2,5}, 孙贝贝^{1,2}

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;
3. 中铁开发投资集团有限公司, 云南 昆明 650500; 4. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 5. 煤炭开采水资源保护与利用
全国重点实验室, 北京 102211)

摘要: 深部脆性岩体开挖常发生板裂破坏, 并可能进一步发生片帮剥落、岩爆等工程灾害, 严重威胁深埋隧(巷)道施工安全。在深部岩体工程中, 受构造应力、开挖条件和工程扰动等因素的影响, 岩体开挖后应力重分布的速率、来压快慢均存在差别。为探究加载速率对板裂围岩失稳破坏的影响, 采用脆性岩石加工成的板裂试样进行单侧限单轴压缩试验, 对不同加载速率下试样宏观破裂、强度特性、声发射(AE)特征以及能量机制进行综合研究。结果表明: ①低加载速率下试样发生大块剥落, 整体失稳并发生分离, 高加载速率下试样未发生大块分离, 但有小块动力弹射现象; ②低频、高幅信号的增多及 b 值的变化表明试样产生了突发式的裂纹失稳扩展, 且这个过程中大小尺度破裂不断交替产生; ③在平稳加载阶段, 高加载速率使试样 AE 活动更加剧烈, 而临近失稳及失稳破坏阶段则相反, 且低加载速率下低频信号、大尺度破裂事件占比更大。因不同开挖方案、施工方法导致的围岩应力重布快慢差异, 在工程上会导致围岩发生板裂后, 进一步诱发不同模式破坏。

关键词: 板裂; 声发射; 脆性岩石; 参数分析; 破坏模式

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)06-1215-11

作者简介: 金爱兵(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jinaibing@ustb.edu.cn。

Experimental study on instability destruction of slab-failure brittle rock under influences of loading rates

JIN Aibing^{1,2}, CHEN Long^{1,2,3}, WU Shunchuan^{1,2,4}, GUO Pei^{1,2,5}, SUN Beibei^{1,2}

(1. Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. China Railway Development and Investment Group Co., Kunming 650500, China; 4. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 5. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102211, China)

Abstract: Excavation of deep brittle rock often leads to slab failure, and may further to flake spalling, rock explosion and other engineering disasters, which is a serious threat to the safety of construction of deeply buried tunnels. In deep rock mass engineering, the rate of stress redistribution after excavation varies due to the factors such as tectonic stress, excavation conditions and engineering disturbances. In order to investigate the effects of loading rates on the destabilization damage of slab-failure surrounding rock, the unilateral limit uniaxial compression tests are conducted using brittle rock processed into slab-failure specimens, and the macroscopic rupture, strength characteristics, acoustic emission (AE) characteristics and energy mechanism of the specimens are comprehensively investigated under different loading rates. The results show that: (1) The specimens exhibit large pieces of spalling, overall instability and separation under low loading rates. The specimens did not separate in large pieces under high loading rates, but there are small pieces of power ejection. The compressive strength of the specimens increases with the increase of the loading rates. (2) The increase of low frequency and high amplitude signals and the change of b -value indicate that the specimens have a sudden failure instability propagation, and the large- and small-scale fractures are alternately generated during this process. (3) At the steady loading stage, the high loading rates make the AE activity of the specimens more intense, while the opposite is true at the near destabilization damage stages, and the low-frequency signal and large-scale fracture events account for

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2905102); 国家自然科学基金项目(51934003, 52174106); 云南省重大科技项目(202202AG050014)

收稿日期: 2023-03-20

*通信作者(E-mail: wushunchuan@kust.edu.cn)

a greater proportion under low loading rates. The difference in the speed of stress re-distribution due to different excavation schemes and construction methods in engineering is the cause of further damage in different modes after the occurrence of slab failure in the surrounding rock.

Key words: slab failure; acoustic emission; brittle rock; parameter analysis; failure mode

0 引言

随着中国资源开采及岩体工程逐渐向深部发展,围岩板裂破坏等深部岩石力学问题日趋凸显^[1-2],给深部工程的安全施工带来了严峻的挑战。板裂破坏指在深部高应力环境下,脆性岩体由于开挖形成多组近似平行的破坏面,破坏面之间的岩板具有由外到内厚度逐渐增加的特点^[3-4],板裂破坏是深埋隧道硬脆性围岩的普遍规律和现象。自 Fairhurst 等^[5]最早对巷道围岩的板裂化破坏现象进行描述以来,许多学者^[6-8]对其进行了深入研究和探讨。

在围岩发生板裂后,板裂结构可进一步发展为剥落破坏^[9]或岩爆^[10-11]。Diederichs^[12]认为围岩板裂化破坏可以发生在应变型岩爆之前,板裂化破坏产生的近似平行的岩板,其产生不稳定的变形(屈曲失稳),为应变型岩爆能量的突然释放创造了条件。关于板裂结构的后续破坏机制,学者们通过室内试验或理论分析的手段进行研究。周辉等^[13]采用石膏制作具有板裂结构特征的模型试样进行单侧限单轴压缩试验,试样的失稳破坏过程表现出应变型岩爆的特征;周喻等^[14]进行类似试验并采用数值模拟方法对比,着重探究了裂纹扩展演化规律;魏新江等^[15]建立考虑岩板间水平应力的圆形隧洞薄板力学模型,计算结果表明随着应力增大,岩板弯曲挠度增大、破坏岩板数量增加,岩爆破坏深度也相应增大;冯帆等^[16]通过理论分析得出各向异性岩板发生板裂屈曲型岩爆的判据,并提出控制对策。

然而,上述关于板裂后续破坏的研究未考虑加载速率的影响。在深部工程中,受岩体构造应力、开挖条件和工程扰动等因素的影响,岩体开挖后应力重分

布的速率、来压快慢均存在差别,这种差别是否对板裂的后续破坏模式产生影响,目前不得而知。只有充分认识了板裂化围岩在不同来压速率下的破坏模式、理解并把握其破坏机制,才能制定相应的控制措施。对此,通过室内试验并结合先进的分析手段可以较好地实现这一目标。

因此,采用脆性岩石加工成的板裂试样进行单侧限单轴压缩试验,对不同加载速率下试样宏观破裂、强度特性、声发射(AE)特征以及能量机制进行综合研究。研究结果对深入认识工程现场板裂状围岩后续破坏机制具有一定帮助,对于隧道开挖现场支护措施的决策也具有参考意义。

1 试验设计

1.1 试样制备与加载方案

试验选用广西贺州大理岩作为研究对象,该岩石呈灰白色,质地均匀、致密,其密度为 2.745 g/mm^3 ,单轴抗压强度为 56.02 MPa ,巴西抗拉强度 3.23 MPa ,属于压拉比较高的脆性岩石。从同一大理岩块体中取岩芯,并加工为多个长方体试样,尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,采用砂线机切割 2 条前后贯通的预制裂隙作为板裂面,裂缝宽度 1 mm 。板裂面长度 50 mm ,与侧边距离分别为 $10, 25 \text{ mm}$,端部与上下端面相距 25 mm ,板裂面长度与岩板厚度已达到当前加工工艺下,使该天然岩石不发生结构性损伤的最大限度,且符合现场板裂厚度变化规律。

采用 WAW-300 电液伺服试验机对试样进行加载,如图 1(a) 所示,加载速率分别为 $0.1, 0.25, 0.5, 1$,

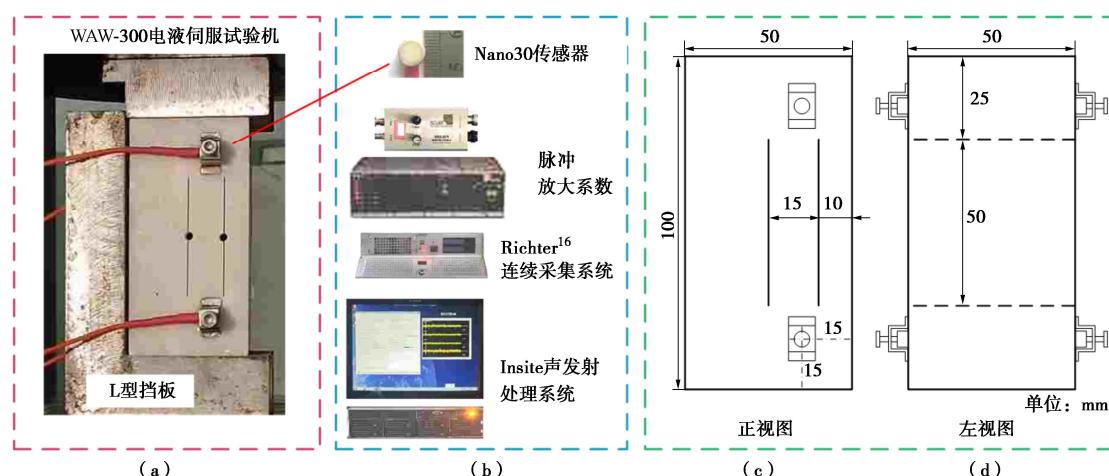


图 1 试验设备、试样设计及声发射系统工作流程

Fig. 1 Test equipments, specimen design and workflow of acoustic emission system

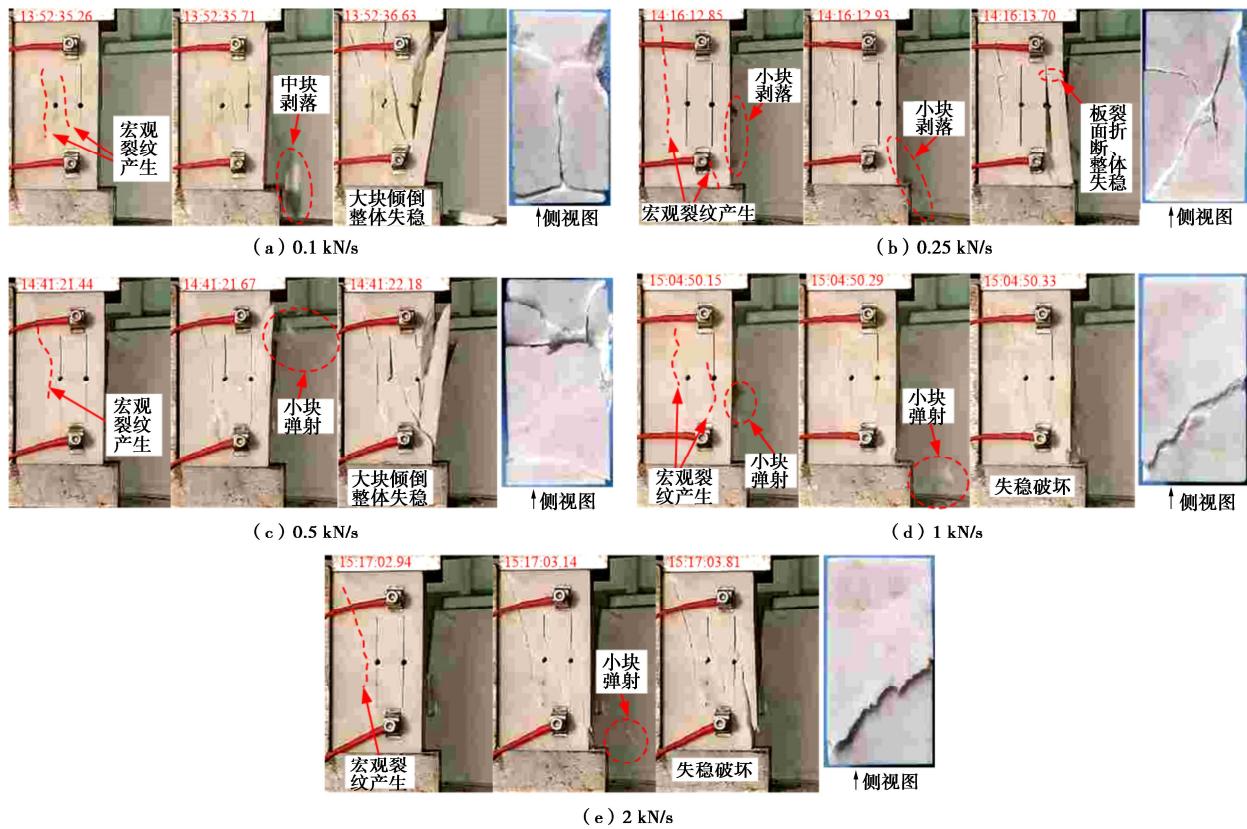


图 2 不同加载速率下试样宏观破裂行为

Fig. 2 Macro-fracture behaviors of specimens under different loading rates

2 kN/s。L型厚钢挡板对试样进行单侧约束, 相对的另一面为临空面。当试样发出明显破裂声响, 或试验机显示负荷值骤降时立即停止加载。

1.2 声发射监测设备

采用 ITASCA 公司开发的 InSite 声发射信号采集系统对试样加载过程中产生的 AE 信号进行监测, 如图 1(b) 所示。AE 传感器使用美国 PAC 公司 Nano30 谐振式传感器, 频率范围 125~750 kHz, 直径 8 mm, 传感器布设方式如图 1(c) 所示, 使用夹具将传感器固定, 传感器与试样之间均匀涂抹硅脂进行耦合。

试样在加载过程中产生的 AE 信号, 经过内置带通滤波器的脉冲放大器以 30 dB 的增益进行放大, 由 1 个 Richter¹⁶ 连续采集系统同步进行 4 个通道的数据采集, 采样频率为 10 MHz, 波形数字化分辨率为 16 bit。为过滤机械及人员噪声, 设置门槛值为 30 mV, 信号每超过门槛值 1 次即视为 1 个 AE 事件, 并采集长度为 204.8 μs (2048 个采样点) 的波形。之后由声发射处理系统及配套软件进行 AE 事件处理。

2 试样宏观破裂及力学特性

2.1 宏观破裂特征

不同加载速率下大理岩板裂试样破裂行为如图 2 所示。所有试样从宏观裂纹产生到最终失稳破坏, 持续时间均不超过 1 s, 说明加载速率对宏观破坏持续时

间的影响较小。宏观裂纹的初始产生位置基本都在第二板裂面以内或者板裂面之间, 至最终失稳时, 第二板裂面以内的裂纹会扩展至上边界, 板裂面之间的裂纹斜向扩展至两板裂面。不同加载速率下试样临空面的破裂行为不同, 随着加载速率的增加, 试样由中块剥落, 变化为小块剥落、小块弹射, 小块弹射的速率也在增加。试样最终失稳时的破坏形态也有所不同, 加载速率在 0.5 kN/s 及以下, 试样会发生大块倾倒或板裂面折断, 整体失稳并发生分离, 而超过 0.5 kN/s, 试样虽发生结构破坏、失稳, 但整体性得到保留, 未分离出岩块。从岩样破坏侧视图来看, 低加载速率下裂纹多、分离出岩块或岩板, 高加载速率下试样只有一条宏观破裂, 但有明显的鼓出, 即岩板向外折但未完全折断。然而, 仅通过加载完成后试样的破裂形态得出低加载速率下试样破坏更加显著彻底的判断, 是不正确的, 因为这与试验加载终止方式及灵敏度有关, 即使试样在停止加载后依然保持整体相连, 但在持续加载下发生彻底破坏是必然的。

为分析板裂面对宏观破裂的影响, 对完整试样进行不同速率加载, 破裂情况如图 3 所示。0.1 kN/s 下试样正面及侧面均有明显的贯通破裂产生, 侧面有中块剥落及小碎屑掉落; 0.5 kN/s 下试样正面无明显裂纹, 失稳破坏时侧面有碎屑产生, 侧面可观察到明显的贯通破裂; 2 kN/s 下正面破裂形态与 0.1 kN/s 类似,

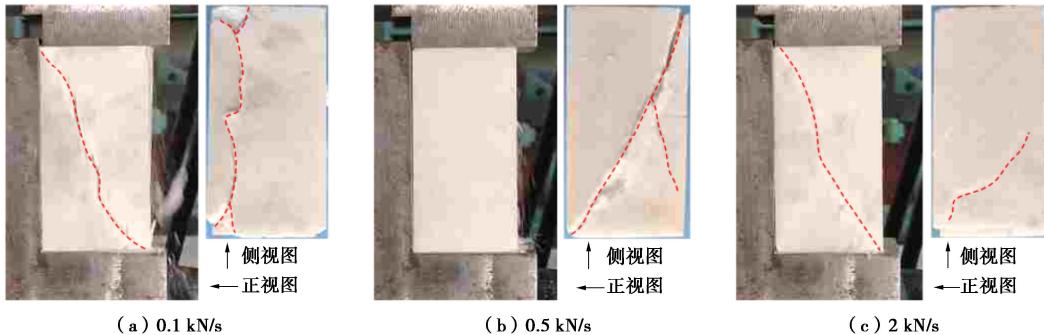


图 3 不同加载速率下完整试样宏观破裂

Fig. 3 Macro-fracture of complete specimens under different loading rates

从左上角到右下角贯通，且该破裂在形成时有碎屑产生，侧面有类似于高加载速率下板裂化试样的鼓出型破裂。因此，随加载速率的增加完整试样的宏观破裂无明显规律，甚至单侧限条件对于试样的主破坏面方向约束效果轻微，相比较之下板裂化试样随加载速率增大宏观破裂有明显的规律，单侧限条件约束下试样主破坏面方向一致，所以后续主要对板裂化试样强度、AE特性以及能量机制进行分析。

2.2 强度特性

大理岩板裂模型强度特性曲线如图 4 所示，很明显，大理岩板裂试样单侧限压缩试验表现出了与标准试样单轴压缩试验相同的加载速率依赖性，即抗压强度随着加载速率的增加而增加。峰值应变在加载速率为 0.5 kN/s 及以下时变化不大，但超过 0.5 kN/s 会随着加载速率的增大而减小，这是因为应变的产生与岩样内部晶粒或胶结物质的摩擦滑移有关，但摩擦滑移需要时间，较高的加载速率会引发更多的内部物质错位塞积，因此从图 3 也可看出，加载速率越高，最开始的裂隙压密阶段越短，在更小的应变下即开始弹性阶段。在之后的弹性阶段、塑性变形阶段的应变，不同加载速率下虽也有差异，但对于峰值应变的影响较小，裂隙压密阶段应变对峰值应变的影响更大。峰后最终应变相对峰值应变的增加量也随着加载速率的增大而减小，这是因为加载速率越低，内部损伤和裂隙发育充分，而在峰后阶段试样存在一定的延性，应力-应变曲线下降较缓；而加载速率越高，试样内部微裂隙的发育越不充分，受载期间耗散能占比也越小，试样破裂表现出较强的脆性，一方面峰前的弹塑性阶段更短、非弹性变形量更小，另一方面峰后应力-应变曲线会迅速下降。根据应力-应变曲线的变化可以从应变角度解释不同加载速率下试样宏观破坏的不同，加载速率低时峰值应变及峰后应变增加量均较大，表明试样向侧方临空面的变形较大，变形量大即更容易使试样内部或表面产生大尺度的破坏，因此低加载速率下试样的破坏更加彻底，而高加载速率下试样仅发生岩

板不完全折断及鼓出。

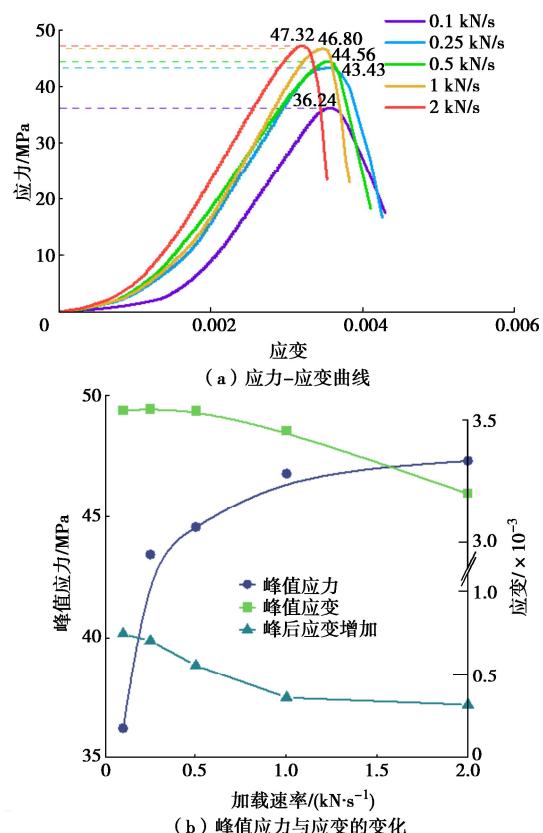


图 4 试样强度特性曲线

Fig. 4 Strength characteristic curves of specimens

3 AE 特征分析

3.1 AE 事件数监测

图 5 展示了不同加载速率下 AE 事件率、AE 累计事件数以及应力与时间的关系。从时间-应力曲线可看出，在开始加载时曲线存在下凹段，之后加载速率会保持稳定，这是由于试验机存在接触试样后加载速率调整问题，在低加载速率下该问题可忽略不计，调整时加载速率不会超出预设值太多，但加载速率较大时试样可能会提前产生裂纹，影响试验真实结果，这也是本次试验加载速率最大设为 2 kN/s 的原因。

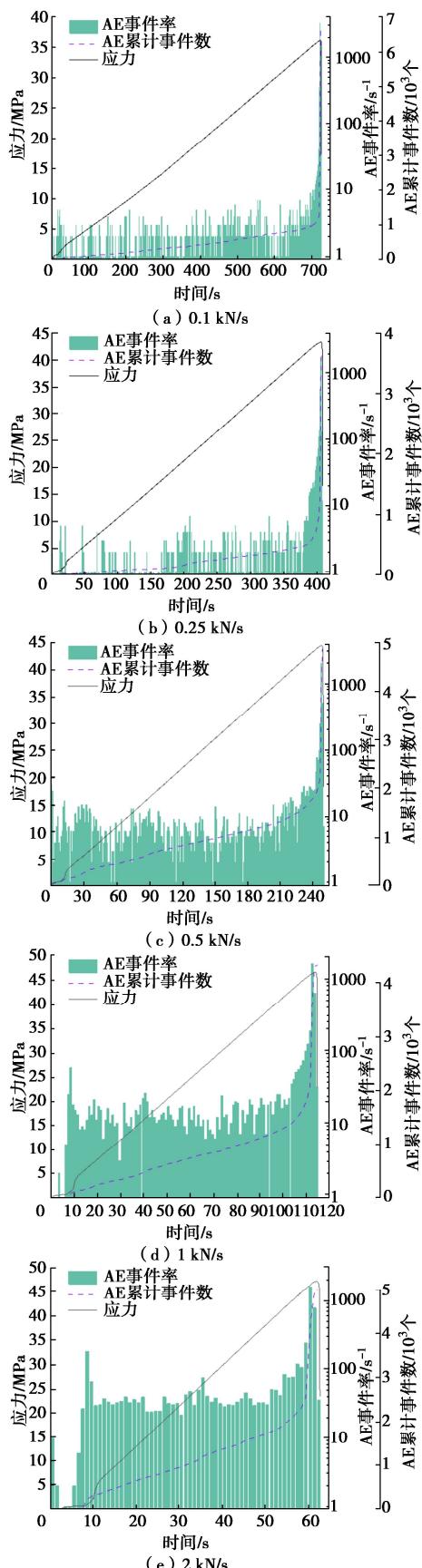


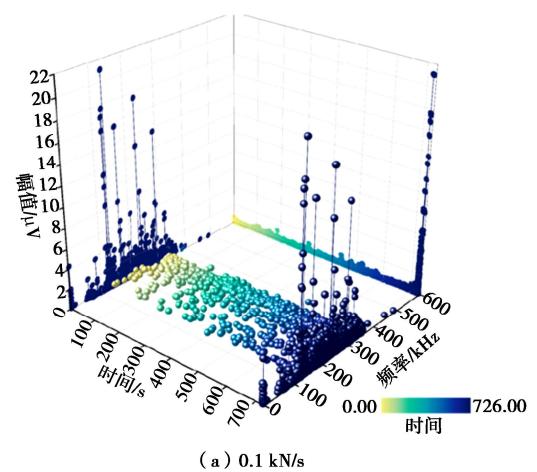
图5 不同加载速率下 AE 事件率、AE 累计事件数和应力与时间的关系

Fig. 5 AE event rate, cumulative number of AE events and stress versus time under different loading rates

不同加载速率下试样的 AE 的累计事件数变化趋势基本一致, 加载初期 AE 累计事件数增加较慢, 临近破坏时, AE 累计事件数陡增。不同的是, 加载开始后到曲线陡增前的时间段(平稳加载阶段)内, 0.1 kN/s 下 AE 累计事件数大约 1000 个, 0.5~1 kN/s 下 AE 累计事件数大约 1500 个, 而 1 kN/s 下 AE 累计事件数增加到 2000 个左右(0.25 kN/s 试样可能由于传感器耦合原因事件数偏少)。从 AE 事件率来看, 该时间段每秒发生的 AE 事件数随着加载速率的增加, 由数个增加到数十个。这一规律说明在平稳加载阶段, 高加载速率使试样 AE 活动更加剧烈。在临近失稳及失稳破坏阶段, 与之前相反, 低加载速率下 AE 事件率更大, AE 事件总数曲线的斜率更大, 表明低应变速率下试样内部产生了更多的破裂事件。值得注意的是, 加载速率为 1, 2 kN/s 时, 加载初期调整阶段 AE 事件有短暂爆发现象, 与 AE 事件率最大值差距在缩小, 因此为了避免加载初期破裂事件影响试验结果, 不再将加载速率增大较为合理。

3.2 帧频特性

AE 波形是具有非平稳性的信号, 经过快速傅里叶变换(FFT)处理可以得到直观的幅值、主频信息, 进而分析 AE 信号全局幅频特性, 图 6 即通过 FFT 处理并引入时间变量得到的三维频谱图(包含两个方向上的投影)。图 6 中可看出在平稳加载阶段, 低速率加载过程中试样表现得更加稳定, 很少有接近 1 μ V 幅值的信号产生, 而随着加载速率的增加, 这一阶段试样产生了许多超过 1 μ V 甚至接近 2 μ V 的信号, AE 活动更加剧烈。随着破坏时间的临近, 所有试样都产生了许多不超过 100 kHz 的低频信号以及超过 2 μ V 的高幅值信号, 而在之前的加载阶段几乎无小于 100 kHz 的低频信号、小于 2 μ V 的高幅值信号发生, 表明低频、高幅信号的增多可作为试样失稳破坏的前兆信息^[17]。



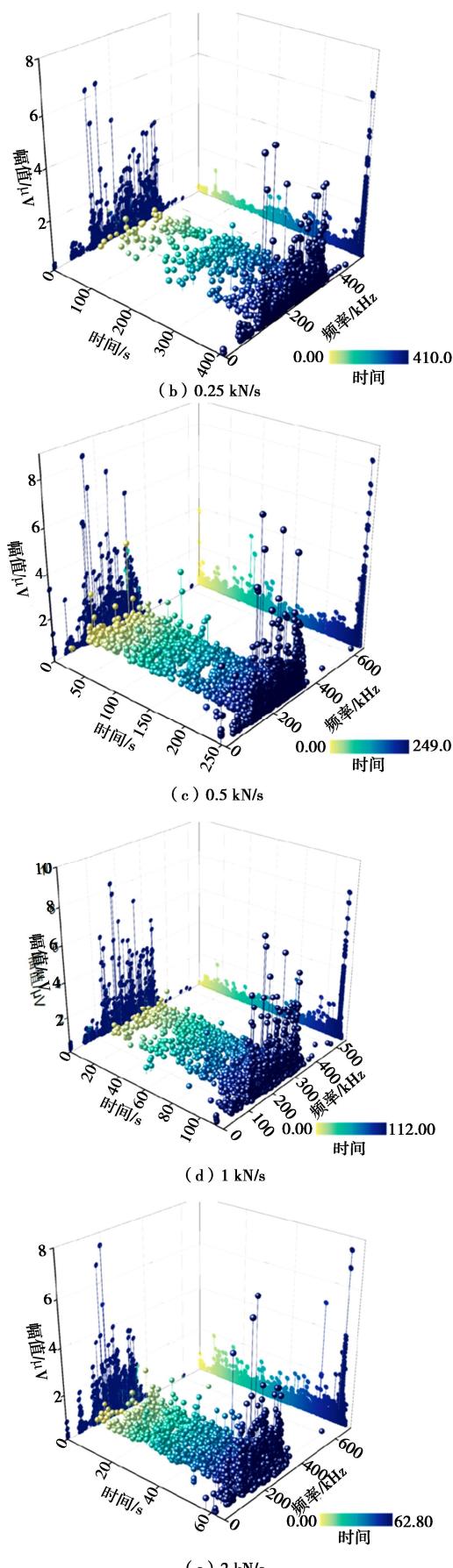


图 6 不同加载速率下试样的 AE 主频-幅值-时间变化图
Fig. 6 Variation of AE frequency-amplitude-time of specimens under different loading rates

声发射信号的主频与传感器共振频率密切相关,根据已完成的 Nano 30 声发射传感器(共振频率为 300 kHz)典型频谱分析^[18-19],将主频分为 3 个范围,包括低频带(0~160 kHz)、中频带(160~410 kHz)和高频带(超过 410 kHz)。对不同加载速率下试样 AE 信号的主频进行统计,如图 7 所示。可看出随着加载速率的增加,AE 信号主频分布于低频带的比例减小,分布于中频带的比例增加。一般认为,相较于小尺度裂纹,大尺度破裂产生的 AE 信号包含更显著的低频分量^[20],因此主频分布的规律表明低加载速率下的试样产生的大尺度破裂更多,与观察到的宏观破裂行为规律一致。

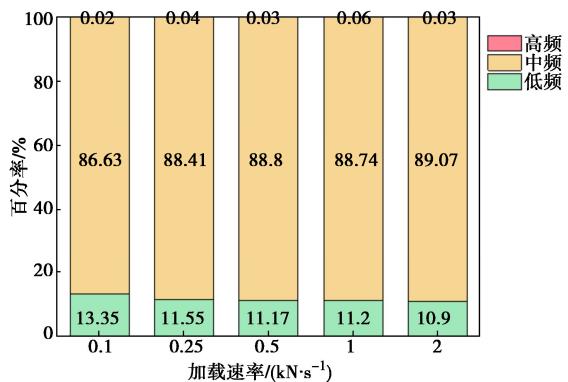


图 7 不同加载速率下试样 AE 信号主频分布

Fig. 7 Distribution of dominant frequency of AE signals of specimens under different loading rates

Ohnaka 等^[21]认为,低频 AE 信号的增加可能由于两个原因:①微裂纹的张开或剪切为较大尺寸往往会产生包含低频分量的 AE 信号;②裂纹的增加会导致岩石内部出现膨胀区,该区域会使发射出的 AE 信号发生衰减,其中高频分量衰减更严重,而低频分量就更容易被检测到。

为了更好地探究加载速率影响下试样 AE 事件的频率特性,对不同应力阶段主频划分在低频带的 AE 信号进行统计,如图 8 所示。从不同加载速率相同阶段的横向对比来看,0.98 σ_f 到加载结束这一阶段,各加载速率下试样产生的 AE 信号数量最多并且有一定规律,即加载速率越小,低频信号占比越大。这一规律表明在临近失稳及失稳破坏阶段,低加载速率下的试样产生的大尺度破裂占比更多,这也印证了低加载速率下试样破坏更加显著彻底的现象。从单个加载速率不同阶段的纵向对比来看,加载速率为 0.5 kN/s 及以上时,在 (0.8~0.9) σ_f 或 (0.9~0.95) σ_f 阶段出现了峰值点,低频信号占比超过了 15%,而加载速率为 0.1, 0.25 kN/s 时,低频信号占比最高点在 0.98 σ_f 到加载结束这一阶段。这一现象是因为,低加载速率下试样内部微裂隙发育较为充分,到临近破坏阶段才引发大尺度破裂,而高加载速

率冲击较大, 试样在弹性阶段结束后微裂隙未得到充分发育便有一定的大尺度裂纹产生。

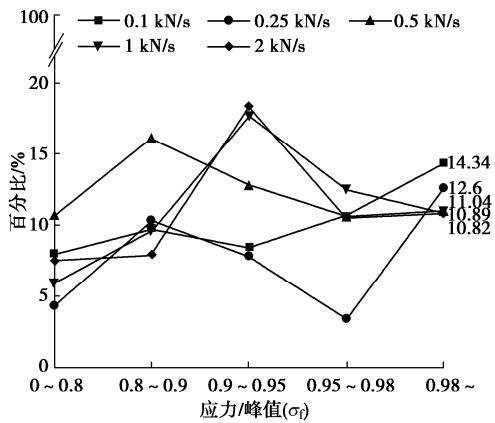


图8 不同应力阶段下低频AE信号占比

Fig. 8 Percentages of low dominant frequency AE signals under different stress stages

3.3 b值演化

b值的概念是由 Gutenberg 和 Richter 在研究地震时提出, 他们发现区域性地震中大于震级 M 的累计次数 N 的对数, 随震级 M 呈线性减少的规律, 即

$$\lg N = a - bM \quad . \quad (1)$$

式中: a , b 为常数。

在岩石室内试验中, 计算声发射 b 值时震级由振幅^[22]代替:

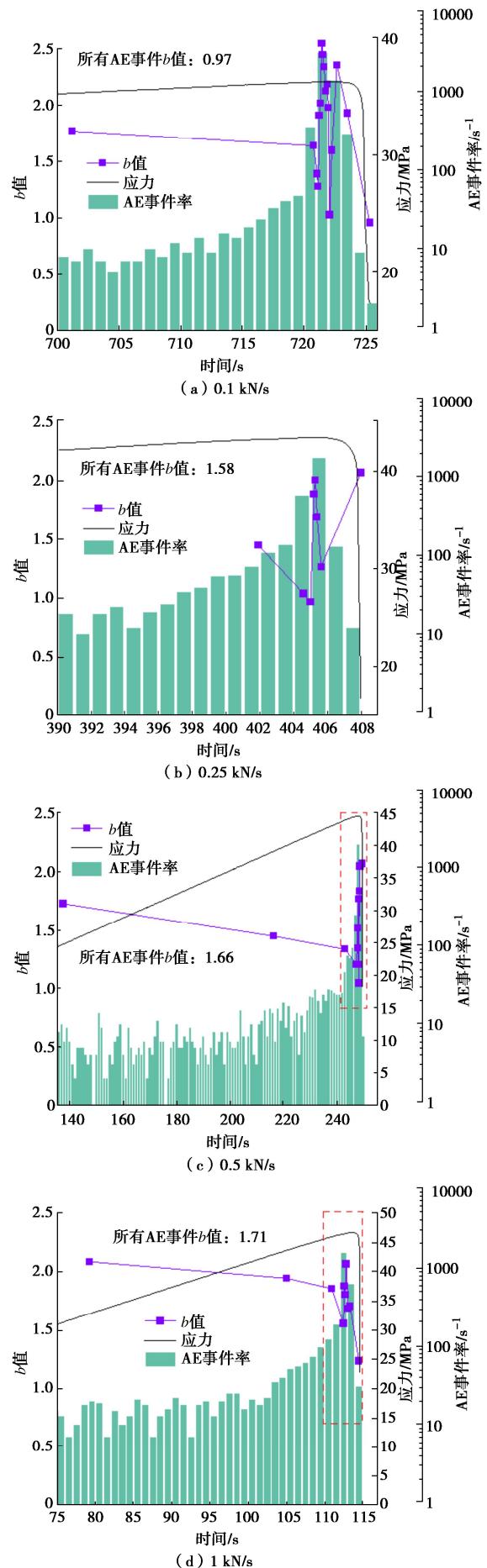
$$\lg N = a - b(A_{\text{dB}}/20) \quad . \quad (2)$$

式中: A_{dB} 为 AE 信号的最大振幅, $A_{\text{dB}} = 20 \lg A_{\text{max}}$, A_{max} 以 μV 为单位的 AE 信号最大振幅值。

b 值可用于表征 AE 事件震级尺度分布的比例, 衡量岩石内部受压条件下不同震级破裂事件的相对数量, 是分析和判定岩石破裂前兆信息的有效手段^[23]。 b 值的变化特征具有特定的物理意义^[24]: b 值增大说明小尺度破裂事件所占比例增加, b 值减小则意味着大尺度破裂增多; b 值在小范围内逐渐变化代表一种破裂渐进式稳定扩展的过程, 而 b 值发生大幅度突然变化则代表一种突发式失稳破坏。

以 1 dB 作为步距对 AE 振幅数据进行统计, 采样窗口为 1000 个 AE 事件, 步长为 333 个 AE 事件, 后采用最小二乘法进行计算求取 b 值。从首个 b 值计算时间到加载结束, b 值、应力及 AE 事件率随时间的变化如图 9 所示。从图 9 中可看出, 加载开始首个 b 值与 AE 事件率开始激增时的 b 值相比变化不大(加载速率为 0.25 kN/s 的试样除外, 因为收集到的 AE 事件数较少, 统计第 2 个 b 值的时间 AE 事件率便发生激增, b 值发生明显下降), 表明试样均在发生微裂纹稳定扩展。之后试样 b 值均有突降, 并在短时间内有大幅度升降变化, 表明试样均产生了突发式的裂纹失

稳扩展, 并且这个过程中大小尺度破裂不断交替产生。



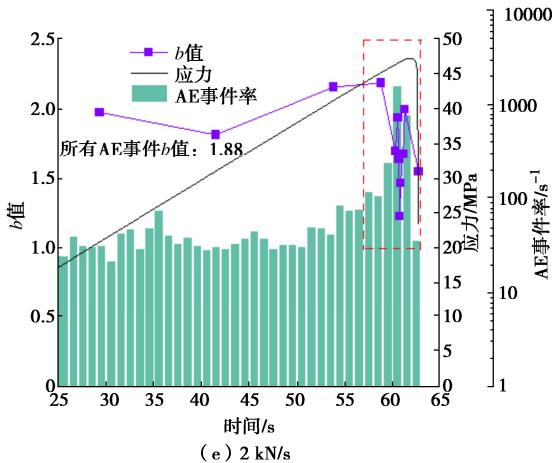


图 9 不同加载速率下 b 值、应力及 AE 事件率随时间变化示意图

Fig. 9 Variation of b -value, stress and AE event rate with time under different loading rates

从图 9 中可以得到的规律是, 加载速率为 0.5 kN/s 及以下时, 试样 AE 事件的首个 b 值在 1.8 以下, 而加载速率为 1, 2 kN/s 时试样 AE 事件的首个 b 值在 2.0 左右, 表明较高的加载速率下, 平稳加载阶段产生的小破裂事件较多。低加载速率下试样 AE 信号 b 值在临近失稳及失稳破坏阶段的变化幅度更大, 随着加载速率的增加 b 值变化幅度从超过 1.5 减小到不足 1, 表明低加载速率下试样发生的是更加彻底的大尺度破裂, 这与试样破坏形态的观察结果相同。所有 AE 时间的 b 值随着加载速率的增大而增大, 这是因为低加载速率下临近失稳及失稳破坏阶段的破裂事件占比较大, 而这些事件又以大尺度破裂为主; 高加载速率下, 平稳加载阶段大量的小尺度破裂事件使总体小破裂事件占比更大。

4 讨 论

4.1 能量机制

岩石的变形破坏是一个热力学过程, 是岩石和外界的能量不断传递、转化的过程, 能量转化的形式包括: 弹性能、耗散能、辐射能、热能、动能以及气体膨胀能等^[25]。其中弹性能的储存过程是可逆的, 既可储存也可释放, 而耗散能用于形成岩石内部损伤和塑性变形, 具有不可逆性。在一个试验中检测每一种能量的演化难度巨大, 考虑到弹性能的可逆性和耗散能的不可逆性, 以及峰值前后对岩石破碎块度和破碎剧烈程度的制约不同^[26], 这里在峰前只考察弹性能和耗散能, 由能量守恒定律有

$$W = U_e + U_d \quad (3)$$

式中: W 为外界输入的能量, 即试验机对岩石做的功; U_e 为储存在岩石中的弹性能; U_d 为岩石耗散的能量。

在峰后阶段, 储存的岩石中的弹性能释放导致岩石发生破坏, 岩石破碎烈度无制约, 需考虑动能。这一阶段岩石依然在受到外界输入能量, 因此有

$$W = U_{es} + U_d + U_k \quad (4)$$

式中: U_{es} 为岩石释放后剩余的弹性能; U_k 为岩石破碎溅出的动能。

峰前弹性能通过加卸载应力-应变曲线以及应变坐标轴来计算, 即认为卸载前对应的应力水平下积累的弹性能等于卸载释放的能量, 弹性能相对输入总能量减少的部分就是该应力水平下的耗散能。为方便计算, 本文对弹性能进行适当简化, 将卸载曲线取加载阶段弹性模量对应的直线。如图 10 (a) 所示, U_{ef} 代表面积表示峰值时刻储存的最大弹性能, U_{df} 代表面积表示峰值时刻已转化为耗散能, 二者之和表示峰值时刻输入的总能量 W_f 。在单向加载条件下 W_f , U_{ef} 分别为

$$W_f = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon, \quad (5)$$

$$U_{ef} = \frac{\sigma_f^2}{2E} \quad (6)$$

式中: ε_f 为峰值应变; σ_f 为峰值应力; E 为加载弹性模量。

对于峰后, 如图 10 (b) 所示, 释放后剩余的弹性能 U_{es} 依然按弹性模量切线三角形面积计算, $U_{ds}+U_k$ 表示加载到峰后时耗散能与动能的总和, 若 W_s 为此时输入的总能量, 则有

$$W_s = \int_0^{\varepsilon_s} \sigma d\varepsilon \quad (7)$$

$$U_{es} = \frac{\sigma_s^2}{2E} \quad (8)$$

式中: σ_s , ε_s 分别为加载终止时的应力、应变水平。

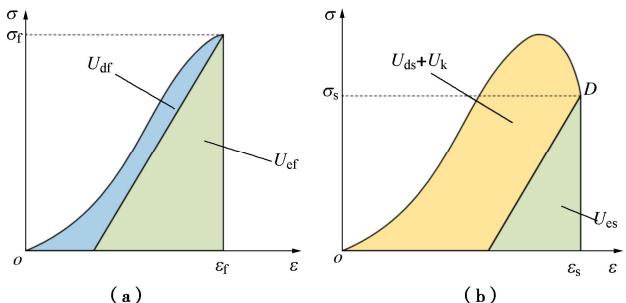


图 10 峰值及峰后能量计算示意图

Fig. 10 Calculation of peak and post-peak energy

根据上述原理计算的不同加载速率下能量密度如表 1 所示。0.1 kN/s 的低加载速率下试样释放弹性能 ($U_{ef}-U_{es}$) 和峰后阶段耗散能加动能 ($U_{ds}+U_k$) 均是最少, 剩余弹性能 U_{es} 也较低, 然而从宏观破坏行为及 AE 特性分析来看, 试样的大尺度破裂事件最多, 破坏也

较为彻底, 却无岩块弹射现象。这一方面表明 0.1 kN/s 加载速率下试样的耗散能较多, 动能较少, 另一方面继续释放弹性能的潜力较小。0.25 加载速率下($U_{\text{ef}} - U_{\text{es}}$) 和($U_{\text{ds}} + U_{\text{k}}$) 最大, U_{es} 却最小, 表明该试样是破裂最彻底、继续释放弹性能的潜力最小的, 但由于该试样 AE 事件获取数量偏少, 无法从 AE 特性角度准确分析。0.5 kN/s 加载速率下 ($U_{\text{ds}} + U_{\text{k}}$) 较大, 破坏行为既有大块失稳倾倒又有小块弹射, 说明该加载速率下破裂耗散能维持较高水平的同时已有一定动能产生。

表 1 不同加载速率下能量密度

Table 1 Energy densities under different loading rates

| 加载速率/ (kN·s ⁻¹) | 释放弹性能/ (10 ⁴ J·m ⁻³) | 剩余弹性能/ (10 ⁴ J·m ⁻³) | 峰后总耗散能加 动能 $U_{\text{ds}} + U_{\text{k}} /$ (10 ⁴ J·m ⁻³) |
|--------------------------------|--|--|--|
| 0.10 | 2.65 | 0.81 | 5.41 |
| 0.25 | 3.84 | 0.67 | 7.65 |
| 0.50 | 4.29 | 0.88 | 7.27 |
| 1.00 | 3.71 | 1.17 | 6.15 |
| 2.00 | 3.74 | 1.23 | 6.02 |

1, 2 kN/s 的高加载速率下($U_{\text{ds}} + U_{\text{k}}$)却小于 0.25, 0.5 kN/s, 对照其试样失稳破坏时岩块弹出, 破坏后仍然保持整体相连的情况, 表明高加载速率下试样破裂耗散能变小的同时仍有较大动能产生。加载速率为 1, 2 kN/s 时 U_{es} 明显大于加载速率为 0.5 kN/s 及以下, 对照试样最外层岩板向外鼓出却未折断的破坏形态, 表明试样失稳后仍具有一定的储能能力, 若继续以高速率受压, 最外层岩板必然会分离出岩块, 并有可能继续产生动能。

通过以上分析可知, 在室内试验中高加载速率下有更多的能量转化为动能, 主要表现为岩块弹射现象, 而低加载速率更容易使能量转化为耗散能, 使试样发生更大尺度的破裂行为。

4.2 工程现场板裂围岩失稳模式分析

在深部脆性岩体工程中, 隧(巷)道的开挖会使围岩应力重新分布, 主要表现为切向应力增加、开挖边界径向应力降为 0, 此时围岩由三向应力状态变为双向应力状态, 常发生平行于开挖面的板裂现象。板裂结构围岩中因施工或其他应力扰动失去径向一面的约束, 围岩所处的双向应力状态会变为单向应力状态, 切向应力进一步增大。当来压超过板裂结构围岩的支撑能力, 板裂结构便进一步发生破坏, 岩板失稳并在重力作用下从母岩脱离, 自然滑落; 或者不断积聚弹性应变能, 直至发生动力失稳, 应变能快速释放并将岩块抛出。本文即针对这一工程问题, 从试验角度对板裂围岩的失稳破坏模式进行分析, 结果表明随着加载速率的增大, 板裂试样的破坏模式逐渐从大块脱落、倾倒失稳变为迅速失稳、小块弹射。与之对应, 工程

现场因原岩应力、开挖方式、开挖速率或者开挖洞型的不同, 导致的应力场调整的快慢差异, 是导致围岩发生板裂后, 进一步发生不同模式最终破坏的原因之一, 缓慢来压使围岩发生静态的剥落片帮破坏, 而来压越快, 板裂化岩爆的发生概率越大。

当然, 深部隧道工程中应力场分布较为复杂, 开挖引起的应力调整, 切向应力增速也会有一定的变化, 这种情况下发生的板裂结构失稳仍属于围岩应变能超过储能极限导致的失稳破坏, 另外还存在爆破振动等外界扰动下的突发性失稳破坏, 均可形成岩板压折、岩块弹射的岩爆灾害。因此, 若想准确、全面破译板裂化结构围岩包含的岩爆前兆信息, 需开展更多不同加载路径下的试验研究。

虽然受试验条件限制, 未设置更多更大的加载速率水平, 但试验结果依然表现出了一定趋势并说明了一些问题。通过对本次试验的结果和问题进行总结, 未来将在以下方面进行深入研究或改进: ①设置更高水平的加载速率, 分析其宏观破坏模式及 AE 特性; ②布置更多传感器, 实现试样内 AE 事件的定位, 进而通过矩张量理论实现破裂类型的定量分析^[27]; ③增加更多监测方法和设备, 如数字散斑、电磁辐射等, 实现板裂结构试样加载破坏过程的多物理场监测, 互相印证以探究不同破坏模式的内在机制。

5 结 论

(1) 在板裂化脆性岩石单侧限单轴压缩试验中, 低加载速率下试样发生大块剥落或板裂面折断, 整体失稳并发生分离, 高加载速率下试样未发生大块分离, 但有小块动力弹射现象。试样的抗压强度随着加载速率的增加而增加。

(2) 板裂化试样单侧限加载至临近失稳时, 会出现更多剪切或混合破裂信号, 且低频、高幅信号会增多, 表征 AE 事件震级尺度分布比例的 b 值发生突降, 表明 AE 特征可用于板裂化试样破裂前兆信息的分析和判定。

(3) 在平稳加载阶段, 高加载速率使试样 AE 活动更加剧烈, 而在临近失稳及失稳破坏阶段, 低加载速率下 AE 事件率更高, 且低频信号、大尺度破裂事件占比更大。

(4) 从试验角度分析板裂围岩的失稳破坏模式, 认为工程现场因不同开挖方案、施工方法导致的应力重布快慢差异, 是使围岩发生板裂后, 进一步发生不同模式最终破坏的原因之一, 缓慢来压使围岩发生剥落片帮, 而快速来压作用导致应变型岩爆的发生。

参考文献:

- [1] FENG X T, GUO H S, YANG C X, et al. In situ observation and evaluation of zonal disintegration affected by existing fractures in deep hard rock tunneling[J]. *Engineering Geology*, 2018, **242**: 1-11.
- [2] XIE H P, GAO M Z, ZHANG R, et al. Study on the mechanical properties and mechanical response of coal mining at 1000 m or deeper[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, **52**(5): 1475-1490.
- [3] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, **9**(1): 59-65.
- [4] 周 辉, 卢景景, 徐荣超, 等. 深埋硬岩隧洞围岩板裂化破坏研究的关键问题及研究进展[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(10): 2737-2749. (ZHOU Hui, LU Jingjing, XU Rongchao, et al. Critical problems of study of slabbing failure of surrounding rock in deep hard rock tunnel and research progress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(10): 2737-2749. (in Chinese))
- [5] FAIRHURST C, COOK N. The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighborhood of a surface[C]//International Society of Rock Mechanics. Lisbon, 1966.
- [6] MARTIN C D, MAYBEE W G. The strength of hard-rock pillars[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, **37**(8): 1239-1246.
- [7] CAI M. Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries—insight from numerical modeling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, **45**(5): 763-772.
- [8] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, **41**(5): 785-812.
- [9] 侯哲生, 龚秋明, 孙卓恒. 锦屏二级水电站深埋完整大理岩基本破坏方式及其发生机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(4): 727-732. (HOU Zhesheng, GONG Qiuming, SUN Zhuoheng. Primary failure types and their failure mechanisms of deep buried and intact marble at Jinping II hydropower station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(4): 727-732. (in Chinese))
- [10] 吴世勇, 龚秋明, 王鸽, 等. 锦屏Ⅱ级水电站深部大理岩板裂化破坏试验研究及其对TBM开挖的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(6): 1089-1095. (WU Shiyong, GONG Qiuming, WANG Ge, et al. Experimental study of slabbing failure for deepburied marble at Jinping II hydropower station and its influences on TBM excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(6): 1089-1095. (in Chinese))
- [11] ZHANG C Q, FENG X T, ZHOU H, et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, **45**(3): 275-288.
- [12] DIEDERICHS M S. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, **44**(9): 1082-1116.
- [13] 周 辉, 徐荣超, 卢景景, 等. 板裂化模型试样失稳破坏及其裂隙扩展特征的试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(增刊2): 1-11. (ZHOU Hui, XU Rongchao, LU Jingjing, et al. Experimental study of instability destruction and crack propagation characteristics of slab failure model specimen[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(S2): 1-11. (in Chinese))
- [14] 周 喻, 孙 铮, 王 莉, 等. 单侧限压缩下预制裂隙试样力学特性及板裂化机制细观研究[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(12): 4385-4394. (ZHOU Yu, SUN Zheng, WANG Li, et al. Meso research on mechanical properties and slab failure mechanism of pre-fractured rock mass under the condition of one side restriction loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(12): 4385-4394. (in Chinese))
- [15] 魏新江, 陈涛涛, 王 霄, 等. 考虑板间相互作用的圆形隧洞板裂屈曲型岩爆力学分析[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(11): 3680-3686. (WEI Xinjiang, CHEN Taotao, WANG Xiao, et al. Mechanical analysis of slab buckling rockburst in circular tunnel considering the interaction between rock plates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(11): 3680-3686. (in Chinese))
- [16] 冯 帆, 李夕兵, 李地元, 等. 正交各向异性板裂屈曲岩爆机制与控制对策研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(7): 1302-1311. (FENG Fan, LI Xibing, LI Diyuan, et al. Mechanism and control strategy of buckling rockbursts of orthotropic slab[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(7): 1302-1311. (in Chinese))
- [17] 储超群, 吴顺川, 曹振生, 等. 基于声发射技术的花岗岩破裂特征试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, **52**(8): 2919-2932. (CHU Chaoqun, WU Shunchuan, CAO Zhensheng, et al. Experimental research on fracture characteristics of granite with acoustic emission technology[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, **52**(8): 2919-2932. (in Chinese))
- [18] GUO P, WU S C, ZHANG G, et al. Effects of

- thermally-induced cracks on acoustic emission characteristics of granite under tensile conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, **144**: 104820.
- [19] ZHAO Y S, CHEN C C, WU S C, et al. Effects of 2D&3D nonparallel flaws on failure characteristics of brittle rock-like samples under uniaxial compression: insights from acoustic emission and DIC monitoring[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, **120**: 103391.
- [20] WALTER W R, BRUNE J N. Spectra of seismic radiation from a tensile crack[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1993, **98**(B3): 4449-4459.
- [21] OHNAKA M, MOGI K. Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1982, **87**(B5): 3873-3884.
- [22] 秦四清, 李造鼎. 岩石声发射事件在空间上的分形分布研究[J]. 应用声学, 1992, **11**(4): 19-21. (QIN Siqing, LI Zaoding. Study on fractal distribution of rock acoustic emission events in space[J]. Applied Acoustics, 1992, **11**(4): 19-21. (in Chinese))
- [23] RAO M V M S, LAKSHMI K P. Analysis of *b*-value and improved *b*-value of acoustic emissions accompanying rock fracture[J]. Current Science, 2005, **89**: 1577-1582.
- [24] 曾正文, 马瑾, 刘力强, 等. 岩石破裂扩展过程中的声发射 *b* 值动态特征及意义[J]. 地震地质, 1995, **17**(1): 7-12. (ZENG Zhengwen, MA Jin, LIU Liqiang, et al. AE *b*-value dynamic features during rockmass fracturing and their significances[J]. Seismology and Geology, 1995, **17**(1): 7-12. (in Chinese))
- [25] 张志镇. 岩石变形破坏过程中的能量演化机制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013. (ZHANG Zhizhen. Energy Evolution Mechanism during Rock Deformation and Failure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013. (in Chinese))
- [26] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(9): 1729-1740. (XIE Heping, JU Yang, LI Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(9): 1729-1740. (in Chinese))
- [27] 储超群, 吴顺川, 张诗淮, 等. 层状砂岩力学行为各向异性与破裂特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, **51**(8): 2232-2246. (CHU Chaoqun, WU Shunchuan, ZHANG Shihuai, et al. Mechanical behavior anisotropy and fracture characteristics of bedded sandstone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, **51**(8): 2232-2246. (in Chinese))

非饱和土与特殊土工程疑难问题的实践和认识学术研讨会（一号通知）

非饱和土与特殊土工程疑难问题的实践和认识学术研讨将于 2024 年 10 月 11—14 日在敦煌举行。

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会兰州理工大学。

承办单位: 兰州理工大学土木工程学院, 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室。

协办单位: 甘肃省土木建筑学会工程勘察专业学术委员会, 甘肃省土木建筑学会地基基础专业学术委员会。

会议以“非饱和土与特殊土工程疑难问题的实践和认识”为主题, 旨在围绕近年来国内外非饱和土与特殊土工程实践中取得的新成果、新认识、新进展等方面进行广泛深入的学术交流。

会议主题非饱和土与特殊土工程疑难问题的实践和认识会议议题论文要求论文题目请根据会议主题与议题自由选定, 论文应为未正式发表过的最新成果, 按照《岩土工程学报》期

刊格式编排, 不得侵犯他人著作权, 不涉及保密内容。将组织专家对论文评审, 通过评审的论文将出版论文集。同时评选会议优秀论文 5~8 篇(第一作者年龄不超过 40 岁), 将在会议闭幕式上颁发优秀论文证书。

非饱和土与特殊土地区的地基处理及变形控制非饱和土与特殊土地区的边坡稳定性与支护技术非饱和土与特殊土地区的深基坑工程和地下工程非饱和土与特殊土的地质灾害机理和防治干旱和半干旱区岩土质文物劣化机理与保护技术非饱和土与特殊土的现场测试新技术、新方法论文按以下方式投稿, 请务必注明作者详细通讯地址、邮编、联系电话及电子邮箱。人工智能技术在非饱和土与特殊土工程中的应用节能环保技术在非饱和土与特殊土工程中的应用。

投稿邮箱: unsat2024@163.com。2024 年 07 月 28 日提交会议论文。联系人: 秦冰(13220212794), 杨校辉(15095338032)。

(大会组委会 供稿)