单向双面临空下不同煤阶煤的破坏特征与能量演化规律研究

李　宁[1,2],杨　瑜[3],杨　科[1],王尚想[1]

(1. 安徽理工大学 矿业工程学院,安徽 淮南　232001;2. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室,安徽 淮南 232001;3. 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)

摘要: 深部高应力环境中,区段煤柱处于高静载及顶板破断引起的动载扰动状态,使得冲击地压等动力灾害频发,为了对煤柱区域冲击地压灾害进行预测及防治,采用不同煤阶煤进行单向双面临空真三轴试验,探究了不同煤阶煤样的强度特性、破坏形式和声发射能量演化特征. 研究结果表明:煤样强度随煤阶增大而增大,煤阶越高其脆性特征越显著,初始垂直应力增大时破坏趋于延性,煤样破裂变形的特征主要受其黏聚力和内摩擦角影响;双面临空状态下煤样受水平向应力扰动更易破坏,破坏形式趋于层理式;动载的应力频率与幅值分别通过主导煤体内部裂纹形态大小与破裂数量影响煤体的损伤变形,动载作用下煤体破坏由内部向临空面演变且以剪切破坏形式为主;不同煤阶煤样的输入能密度与耗散能密度能量演化规律大体一致,应力扰动频率可抵消抗剪强度指标对能量耗散的降低作用. 研究成果揭示了赋存应力状态改变时不同煤阶单向双面临空型煤柱的破坏规律,对区段煤柱冲击地压的预测和防治具有借鉴意义.

关键词: 不同煤阶;真三轴试验;单向双面临空;冲击破坏;声发射

中图分类号: TD 457　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)03-0736-14

Study on the damage characteristics and energy evolution law of different rank of coals under unidirectional two-sided unloading condition

LI Ning[1,2], YANG Yu[3], YANG Ke[1], WANG Shangxiang[1]

(1. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Huainan, Anhui 232001, China; 3. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In deep high-stress environments, panel coal pillars are subjected to high static load and dynamic loading disturbance induced by roof fracturing, which leads to frequent occurrences of dynamic disasters such as rock bursts. To predict, prevent and control rock bursts in coal pillar zones, true triaxial tests under the unidirectional two-sided unloading condition were conducted on

收稿日期: 2025-06-20　　**修回日期:** 2025-09-13　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250232

基金项目: 国家自然科学基金项目(52204193,U21A20110)

第一作者: 李　宁(1987—),男,江苏徐州市人,副教授,硕士生导师. E-mail: nli@aust.edu.cn

通信作者: 杨　瑜(2000—),男,安徽省芜湖市人,博士研究生. E-mail: yangyu200921@163.com

引用格式: 李　宁,杨　瑜,杨　科,等.单向双面临空下不同煤阶煤的破坏特征与能量演化规律研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):736-749.

LI Ning, YANG Yu, YANG Ke, et al. Study on the damage characteristics and energy evolution law of different rank of coals under unidirectional two-sided unloading condition[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 736-749.

coal samples of different ranks, and the strength characteristics, failure modes, and acoustic emission energy evolution features of the coal samples with different ranks were investigated. The results show that: the strength of coal samples increases with coal rank, and the higher the coal rank, the more pronounced its brittle characteristics; failure tends to be ductile as the initial vertical stress increases, and the characteristics of fracture and deformation of coal samples are mainly influenced by their cohesion and internal friction angle values. Under the condition of unidirectional two-sided unloading, coal samples are more susceptible to failure under horizontal stress disturbance, and the failure mode tends to be bedding-type. The frequency and amplitude of dynamic load affect the damage and deformation of coal mass by dominating the size and morphology of internal cracks and the number of fractures within them, respectively; the failure evolves from the interior to the unloading surface under dynamic loading condition, predominantly in the form of shear failure. The energy evolution patterns of input energy and dissipated energy densities for coal samples of different ranks are generally consistent, and the stress disturbance frequency can offset the reduction effect of shear strength on energy dissipation. The research findings reveal the failure laws of unidirectional two-sided unloading coal pillars with different ranks under in-situ stress change condition, and provide a reference for prediction, prevention and control of rock bursts in panel coal pillars.

Key words: different ranks of coal; true triaxial test; unidirectional two-sided unloading condition; bursting damage; acoustic emission

随着煤炭资源开采深度和强度的增加，采掘空间发生冲击地压等动力灾害的风险愈发增大．在“三高”条件的威胁下，煤岩应力状态的变化导致灾害的孕育发展过程变得更为复杂．我国东部老矿区及陕西、内蒙等新建矿井在煤巷掘进期间，相邻工作面区段承载煤柱在高静载及强动载扰动下引起的冲击地压事故频繁发生．据相关资料统计，东部矿区采深超过 800 m 的采区中，区段承载煤柱发生的冲击事件占比达总事故的 63%，因此其失稳及冲击现象已然成为深部煤炭资源开采的重要威胁[1-3]．亟待采用新的方法探究区段煤柱静载加卸载状态和动载扰动变化下的力学响应特征及冲击诱发机制，得到动静载叠加下的失稳冲击判识准则，进一步完善煤柱型冲击地压的监测及防治方法，实现煤炭资源的安全高效精准开采[4-7]．

煤岩力学性质主要受其自身变质程度影响，并随煤阶变化呈现不同特点[8]．了解不同煤阶煤岩破坏特征有助于揭示不同煤质煤层的致冲机理，对冲击地压灾害的防治有重要指导意义．国内外学者们开展了大量不同煤阶煤样研究并取得了显著成果．文献[9]探究了超临界状态下的 CO_2($ScCO_2$)对煤有机组成和结构的影响规律．文献[10]揭示了不同煤阶煤储层的应力敏感性特征及差异性．文献[11]分析了不同煤阶煤体液氮循环冻融过程中的传热、变形损伤特征．文献[12]探究了不同煤阶煤样硬度和裂缝扩展．文献[13]系统分析了煤阶对不同 CO_2 性质和储层深度 CO_2 吸附诱导煤基质膨胀的影响．文献[14]揭示了循环载荷对不同煤阶煤力学特性的影响及破坏机制．

煤岩破坏特征除受其自身物理力学特性影响之外，也会受到外部复杂应力环境改变的影响．文献[15]分析了试样的单轴、双轴和多轴预应力条件以及各种应变速率的压裂过程．文献[16]通过循环加卸载试验评估了褐煤在不同加载条件下的力学性能．文献[17]探明了回采过程中临空侧巷道煤岩动力显现特征．文献[18]进行煤样的三轴下的单面临空试验，揭示了赋存条件变化对动力灾害影响．文献[19]研究了不同应力路径下深部岩体试件的变形及强度特性．文献[20]开展了高静载和动载耦合作用下煤岩组合体真三轴单面临空试验，分析了煤岩组合体界面处力学特征和强度条件．

能量演化可以反映煤体受力变形全过程，量化能量积蓄和释放特征，从根本上揭示外力作用下煤体损伤和破坏规律．文献[21]揭示了煤岩体冲击动力学特性与能量演化之间的内在联系．文献[22]研究了破坏过程中煤样应变场与声发射能量响应特征．文献[23]探究了不同速度和约束状态的煤体能量耗散规律和损伤特征．文献[24]分析了煤岩在发生冲击破坏过程中能量演化的内在机制．文献[25]进行不同加载速率下的单临空面真三轴加载压缩

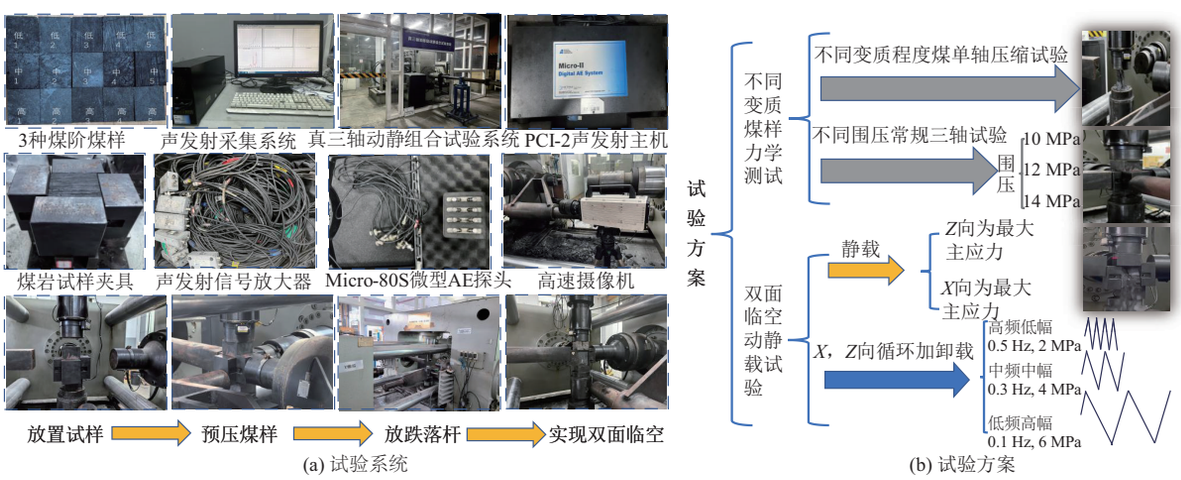
试验揭示了其损伤机制和能量特征.

综上所述,在考虑煤体变质程度的煤柱冲击危险性差异方面的研究较少.已有研究主要集中于探究常规加卸载路径和单面临空条件下应力扰动对煤体的破坏过程,然而实际的相邻区段巷道掘进会使得煤柱形成单向双面临空状态,应力路径从三向五面向双向四面受力演化.因此,本文针对性选取不同煤阶的煤体进行真三轴加卸载试验,对单向双面临空条件下煤体受动静载作用的强度、变形、破坏及能量演化特征进行研究,探究掘进过程中的煤柱型冲击地压的孕灾机制.研究结果能够为不同煤阶煤柱的冲击地压风险智能判识、监测预警和现场防治提供理论依据.

1 试验装置及方案

1.1 试验装置

试验设备为中国矿业大学真三轴加卸载动静组合试验系统(如图1所示).该系统能以位移和应力2种加载方式快速控制3个轴向压力,达到最大静载的响应时间仅需20 s,Y轴和Z轴最大载荷为1 500 kN,X轴方向为2 000 kN.该系统的高速、大载荷和高压力等特点可满足开展双面临空循环加卸载试验的要求,实现模拟真实开采环境下的煤柱卸荷过程.试验过程中在设备的夹具以及跌落杆位置安装声发射(AE)探头和高速摄像机,探究试样的能量积聚耗散特征以及宏观破坏形式.



(a) 试验系统 (b) 试验方案

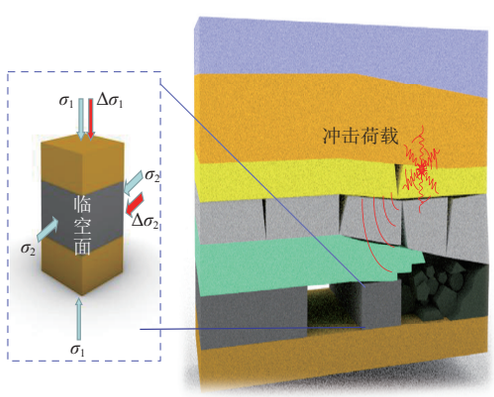
图1 真三轴试验系统及试验方案

Fig 1 True triaxial test system and test plan

1.2 试验方案

煤体的破坏形式除受自身物理力学性质等因素影响外,应力路径及所处加载状态的差异对煤体的作用也尤为重要.如图2所示,随着煤层的采出,区段煤柱的应力路径产生变化,由开始的三向六面约束加载到单侧临空五面加载,最终转变为双侧临空四面加载的状态.此时,开采扰动造成近场岩层断裂产生的应力波在顶板岩层中传播,最终作用于单向两侧临空的煤柱上,其本身的高静载与动载应力波叠加会诱发煤柱失稳及冲击地压等灾害.

试验采用3种不同煤阶的煤样,其中无烟煤和褐煤取自内蒙古乌兰木伦矿,烟煤取自陕西大柳塔矿.试样分别加工成标准∅50 mm×100 mm圆柱体和75 mm×75 mm×100 mm长方体,按照煤阶由低到高分为D(褐煤)、Z(烟煤)、G(无烟煤)3组.加工过程中对试样表面进行切割、打磨,使其平整度误差控制在±0.05 mm,相邻面的垂直度误差为±0.25/(°),保证试样在加载过程中6个方向受力均匀.



注:σ_1为煤柱所受的竖向静载主应力;$\Delta\sigma_1$为竖向的动载应力增量;σ_2为煤柱所受的水平方向静载主应力;$\Delta\sigma_2$为水平方向的动载应力增量。

图2 单向双面临空煤柱应力加载示意

Fig. 2 Schematic diagram of stress for coal pillar under unidirectional two-sided unloading condition

试验采用PCI-2声发射系统，传感器门槛值为40 db，信号采集的频率范围为100～400 Hz，采样率为2 MSPS. 鉴于试验条件为双面临空，通道数设置为4，声发射探头布置于仪器夹具预设孔位，探头紧贴煤样，具体位置坐标如图3所示.

1.2.1　双面临空静载试验

为了探究不同煤阶煤柱在单向双面临空条件下的应力演化规律，首先进行单轴和常规三轴压缩试验，获得不同煤阶煤体的基本物理力学参数. 在此基础上设计真三轴双面临空静载试验方案，具体的应力路径设计方案如图3所示. 为避免试验结果的偶然性，每组试样不少于3个. 详细的试验方案如下：

1）预加载阶段：采用应力加载方式，以0.5 MPa/s的速度对X，Y和Z方向分别施加预应力σ_2，σ_3，σ_1，加载至1 MPa，从而固定试样；

2）初始应力加载阶段：基于试样所采集矿区地应力实测数据资料，以v=0.05 MPa/s的加载速度将试样加载至初始应力状态，稳定120 s. 初始应力条件分别为（σ_1=19 MPa，σ_2=17 MPa，σ_3=14 MPa），（σ_1=21 MPa，σ_2=17 MPa，σ_3=14 MPa），（σ_1=23 MPa，σ_2=17 MPa，σ_3=14 MPa）3种方案；

3）卸荷到双面临空阶段：将Y轴后方跌落杆放下，同时将Y轴前方液压杆以位移加载方式设定远离试样，使得试样由三向六面加载状态转变为双向四面加载状态；

4）持续施加静载阶段：Z方向以1 MPa/s的加载速度增加应力，同时X方向以v=0.05 MPa/s的卸载速度进行缓慢卸荷，直至试样破坏（实际工况中水平X方向约束作用会减弱）；

5）为了讨论不同地应力条件下煤体的加卸载力学响应，将步骤2）初始应力条件（σ_1=19 MPa，σ_2=17 MPa，σ_3=14 MPa）中最大主应力方向改为水平方向，重复步骤1）～4）.

1.2.2　双面临空循环加卸载试验

试验步骤1），2），3）与1.2.1小节保持一致.

4）循环加卸载阶段：保持X方向荷载不变，以0.1 MPa/s的加载速度升高Z向应力至一定值后进行多次循环加卸载，同时在X方向以v=0.05 MPa/s的卸载速度进行缓慢卸荷. 若一个循环加卸载结束，试样仍未破坏，则继续升高Z向应力至一定值后再次进行循环加卸载，重复此过程直至试样发生破坏. 循环加卸载方案分为低频高幅（0.1 Hz，6 MPa）、中频中幅（0.3 Hz，4 MPa）和高频低幅（0.5 Hz，2 MPa）3种. 在X向循环加卸载试验中，将循环加卸载方向调整至X向，其余试验步骤同上述保持一致.

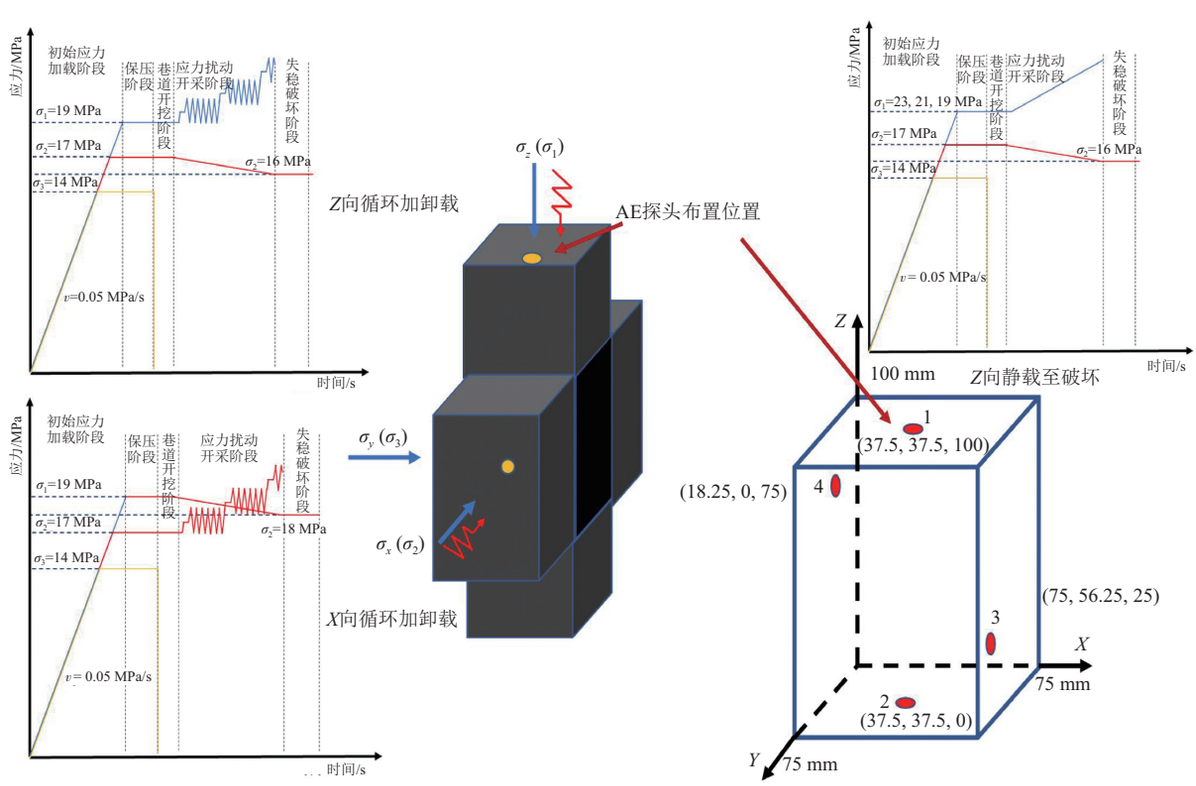


图3　循环加卸载应力路径及声发射探头放置示意

Fig. 3　Diagram of cyclic loading and unloading stress pathways and acoustic emission sensors layout

1.3 煤样物理力学性质测试

通过单轴压缩试验测得3种煤阶试样由低到高的平均单轴抗压强度 σ_{CD},σ_{CZ},σ_{CG} 分别为16.52,21.49,26.99 MPa,线性拟合后计算得到弹性模量 E_D,E_Z,E_G 分别为1.75,2.11,4.14 GPa. 如图4所示,同种煤阶试样的应力-应变曲线较为贴合,验证了试验结果的可靠性和合理性.

对3种煤阶试样进行不同围压下的常规三轴压缩试验,根据莫尔库仑准则进行拟合得到不同试样的黏聚力和内摩擦角. 由表1可知不同煤阶试样的单轴抗压强度和弹性模量随煤阶升高呈线性增长,而黏聚力和内摩擦角呈开口向上的二次函数变化.

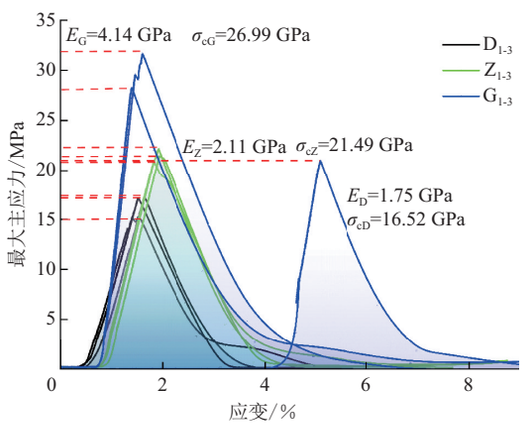


图4 单轴压缩下3种煤阶试样的应力-应变曲线

Fig. 4 Uniaxial compressive stress-strain curves of three ranks of coal samples

表1 不同煤阶试样的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal samples under different ranks

煤阶	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 ϕ/(°)	弹性模量 E/GPa	单轴抗压强度 σ_c/MPa
低阶煤	4.80	30.50	1.75	16.52
中阶煤	3.30	15.20	2.11	21.49
高阶煤	7.00	23.50	4.14	26.99

2 单向双面临空试验结果分析

2.1 双面临空静载试验

2.1.1 初始垂直应力对试样力学响应的影响

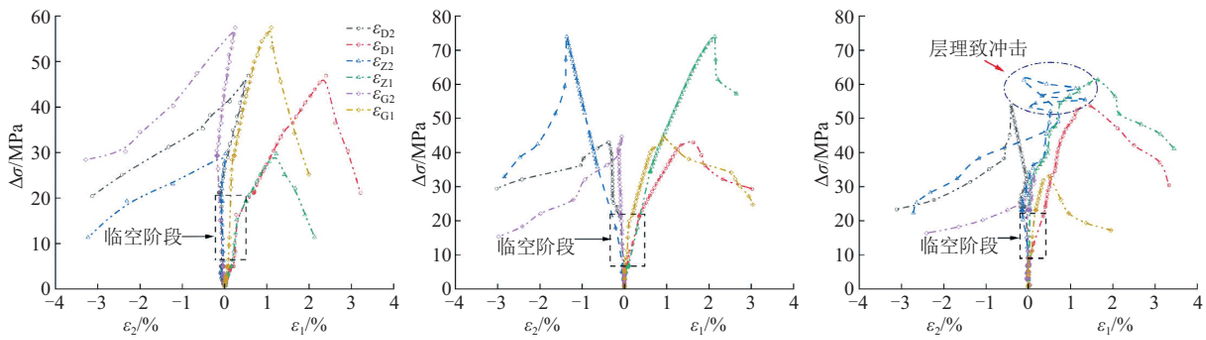
图5为不同初始垂直应力条件下3种煤阶试样的应力-应变曲线. $\Delta\sigma$ 为垂直应力与最小主应力之差;ε_1,ε_2 为竖向和侧向应变;ε_{D1},ε_{Z1},ε_{G1} 分别为低、中、高3种试样的最大主应力方向应变;ε_{D2},ε_{Z2},ε_{G2} 为中间主应力方向应变. 最小主应力方向由于在加载到初始应力环境后快速卸荷直至为零,因此暂不探究其应力-应变特征.

由图5可知,在不同初始 σ_1 条件下,3种煤阶试样的应力-应变变化规律有着显著差异. 随着 σ_1 的增加,3种煤阶试样的峰后曲线由线性转为非线性,且峰后斜率逐渐减小;这表明垂直应力增大后,试样在初始加载阶段已产生更显著的内部损伤,导致后续高静载下变形与破坏更剧烈;峰后斜率的变化进一步表明:煤体随采深增加(对应 σ_1 增大),其破坏特性从脆性逐渐过渡到延性. 当 σ_1=19 MPa时,应力-应变曲线呈明显线性变化且改变煤阶后试样应力-应变变化差异最为直观.

对于不同煤阶试样,峰后曲线下降趋势随煤阶增大而加剧,表明试样破坏的脆性特征随煤阶升高愈发显著. 高阶试样在初始垂直应力 σ_1 由19 MPa增大到23 MPa的过程中,峰值应力由58 MPa降至32 MPa,表明增大初始垂直应力会降低高阶试样的承载力. 在 σ_1=23 MPa时,低阶试样出现峰值应力异常突增,中阶试样曲线呈环状变化;而低阶试样在 σ_1 由19 MPa增大到21 MPa过程中峰值应力有所降低,因此其受初始垂直应力的影响与高阶试样大体一致. 中阶试样在 σ_1=19 MPa时峰值应力仅为29 MPa,远小于初始垂直应力增大后的数值,说明中阶试样峰值应力整体趋势是随 σ_1 增加而增大,受 σ_1 影响与低阶、高阶试样相反. 基于常规三轴试验中阶试样的黏聚力和内摩擦角明显低于高阶和低阶的结果分析可知,煤体的变形主要受其抗剪强度指标影响.

当从初始应力状态卸载至临空阶段时,由于试样的最小主应力瞬间卸荷为零,导致 $\Delta\sigma$ 突增接近15 MPa. 但从图5曲线中可以发现 ε_1 和 ε_2 数值变化均在0.3%范围内,说明在仍有应力加载的方向上应变几乎不受影响. 在不同初始 σ_1 条件下,当试样达到峰值强度时,ε_2 除在 σ_1=21 MPa时接近−1.5%,其余情况下均不超过−0.5%,而 ε_1 在0.5%~2.5%之间波动变化,故试样的竖向应变更易受初始垂直应力影响. 由于煤的层理垂直于 Y 向而与 X 向近似平行,同时煤体自身的强度低且易碎,其表面微小裂缝在外力作用下易发生压密和裂隙扩展,侧向应变 ε_2 多数随垂直应力增大而减少. 因此,在两侧临空状态下的试样受四面应力加载会倾向于临空侧发生变形而致使侧向变形程度有所降低. 当垂直应力增大到23 MPa时,中阶试样侧向应变 ε_2 有明显环状变化. 考虑试样存在明显层理结构和裂缝,推测试样侧向由于层理结构发生冲击,随煤块向临空面不断抛出,冲击缓慢减小致使侧向应变出现此现象.

综上所述，试样的脆性破坏特征与煤体变质程度有关，随着煤阶的增大愈发显著，初始垂直应力增加会促进煤样破坏特性从脆性过渡到延性破坏．在双面临空状态下煤样破坏变形优先作用于临空侧，中阶试样由于其自身抗剪强度指标差异，其变形在侧向存在明显环状变化．



(a) σ_1=19 MPa　　(b) σ_1=21 MPa　　(c) σ_1=23 MPa

图 5　不同垂直应力条件下试样全应力-应变动态曲线

Fig. 5　Full stress-strain dynamic curves of samples under different vertical stress conditions

2.1.2　初始水平应力对试样力学响应的影响

考虑部分煤矿在构造应力影响下初始水平应力大于竖直应力情况，将初始最大主应力设置在 X 向，对比分析最大主应力方向改变后试样的破坏特征．图 6 为低、中和高 3 种煤阶试样在不同方向初始应力条件下的应力-应变曲线，其中 Z 和 X 表示初始最大主应力方向，$\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_2$ 代表初始最大主应力在 X 和 Z 方向下竖向应力与最小主应力之差．

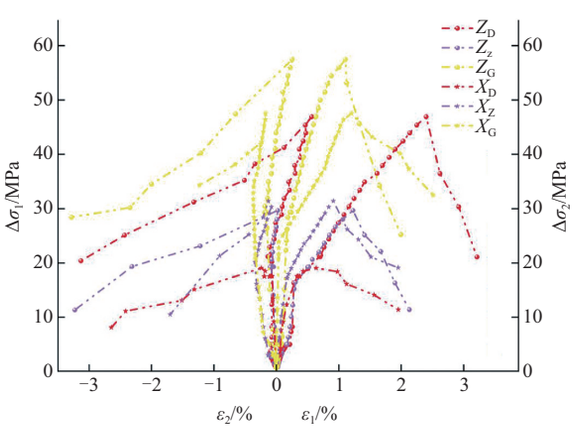


图 6　不同初始应力条件下试样应力-应变曲线

Fig. 6　Stress-strain curves of samples under different initial stress conditions

由图 6 可知，初始最大主应力方向改变后低阶和高阶试样的峰值应力存在 10 MPa 以上差值，中阶试样峰值应力几乎不变．由此可见初始最大主应力方向为 X 向时会降低低阶和高阶试样的破坏所需临界应力．在初始最大主应力方向为 Z 向时，低阶试样峰值应力低于高阶试样 10 MPa；当初始最大主应力方向改变为 X 向，其差值增大为 31 MPa，因此初始最大主应力为水平向会显著增强煤阶变化带来的试样强度差异．3 种试样的峰后曲线下降趋势均在初始最大主应力方向改变后得到了提高，表明初始最大主应力在水平向会强化试样的脆性特征，同时所有试样应力-应变曲线的整体变化规律保持一致说明初始最大主应力方向不会影响煤样的整体变形过程．

在 $\Delta\sigma$ 相同条件下，初始最大主应力方向为 X 向时，其 ε_1 和 ε_2 显著小于初始最大主应力为 Z 向时．基于初始最大主应力 Z 和 X 向与试样层理方向倾斜角度大体一致，说明初始最大主应力为水平方向会促进试样沿层理方向产生裂隙并向临空面扩展，试样发生剥离现象．

2.2　不同初始最大主应力方向下循环加卸载试验

为探究双面临空条件下煤柱在不同方向、频率及幅值应力扰动下的失稳破坏特征，对高阶试样施加不同频率、幅度和方向的加卸载扰动，其应力-应变曲线如图 7 所示．

由图 7 可知，在动载扰动方向为 X 向时，试样的峰值应力明显低于 Z 向．从循环加卸载过程局部放大图中可以看出，在施加低频低幅循环加卸载时，试样破坏前 X 向的循环次数比 Z 向少 1 次；而高频低幅循环加卸载作用下，试样在 X 向经历 1 个循环就破坏，Z 向则在 3 个循环后试样才破坏．故在相同频幅的循环加卸载作用下，试样受水平向应力扰动更易发生破坏，且这种现象在循环加卸载频率升高后愈发明显．结合 2.1 节的静载试验可得出初始最大主应力方向和应力扰动方向为水平时均会降低试样的破坏临界应力．

对比循环加卸载方式为高频低幅与低频高幅试样的应力-应变曲线可知，无论是 X 向还是 Z 向

施加循环加卸载，试样的峰值应力无显著差异，考虑频率与幅度作为循环加卸载的强度指标均会显著影响试样的变形过程，表明频率与幅度两者大小对试样破坏变形的影响趋势相近．当2种不同频幅的应力扰动方向为竖向时，试样峰值应力分别为43和41 MPa，远小于竖向静载条件下的59 MPa，表明动载的应力扰动形式比静载更易导致试样破坏．

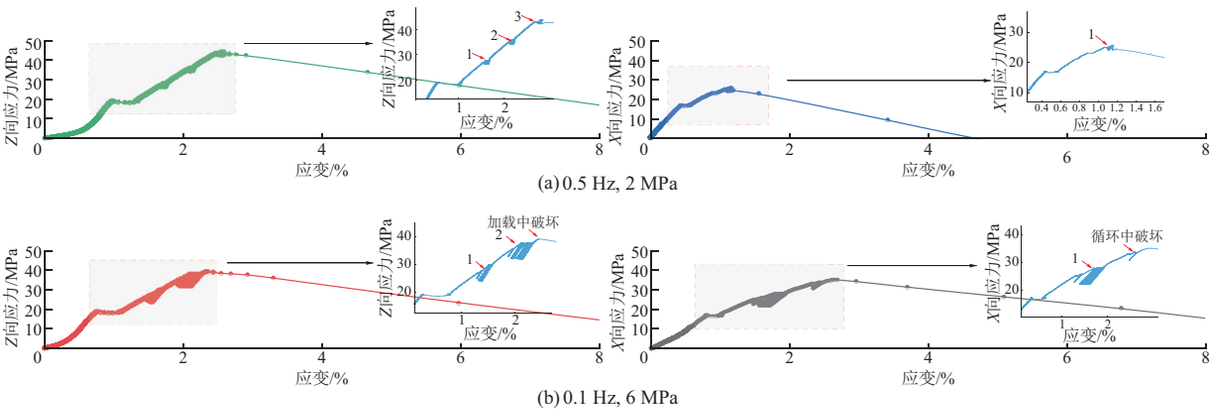


图7 循环加卸载条件下不同初始最大主应力方向和不同频幅应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves with different initial maximum principal stress directions and different frequenciesies and amplitudes under cyclic loading and unloading conditions

3 煤体破坏特征与能量分析

3.1 不同煤阶煤破坏能量与形态特征

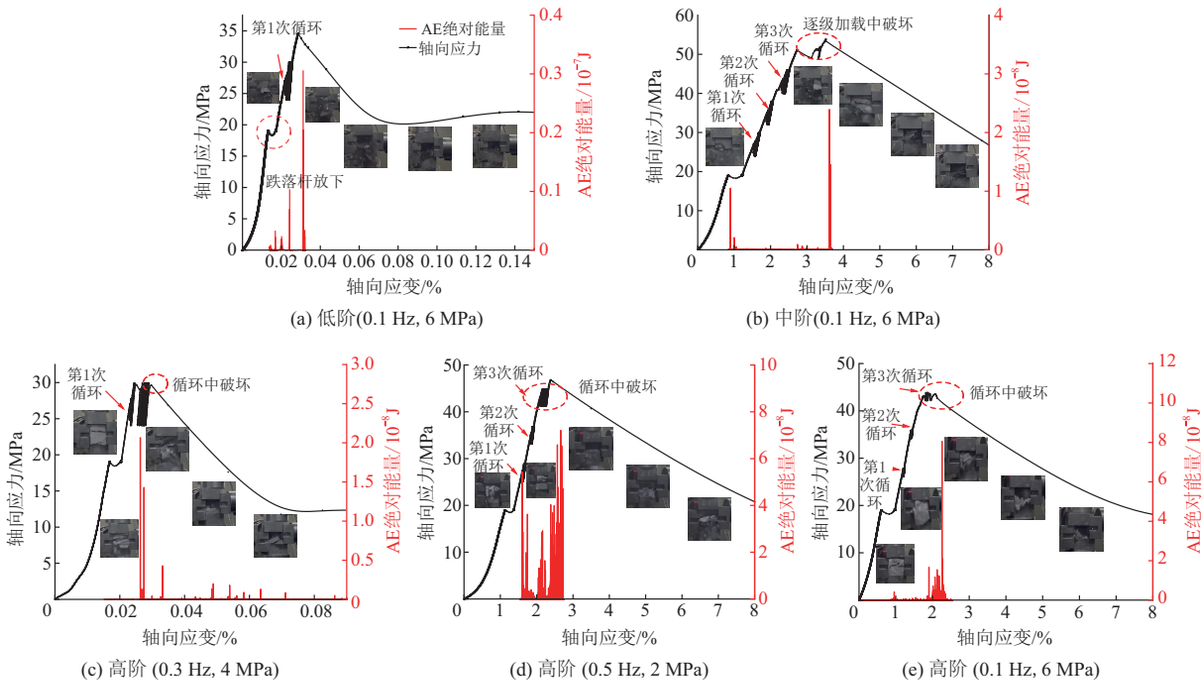
煤柱在失稳破坏及动态冲击过程中常伴随大量能量积聚释放[26-30]．本试验中煤体在初期加载阶段吸收弹性能，后期逐级循环加卸载到破坏阶段释放弹性能，2个阶段分别处于能量积聚和释放状态，宏观表现为试样裂隙的扩展．考虑本文研究重点为煤柱双面临空状态下受应力扰动的力学响应特征，在加载到初始应力环境之后借助声发射系统采集弹性能耗散产生的脉冲信号，实时监测试样失稳和冲击灾害孕育发展的过程，如图8所示．由于低阶和中阶煤样在较高频率循环荷载下易发生失稳和冲击破坏，无法收集有效的加卸载数据，从能量积聚耗散角度可作进一步补充说明．

绝对能量可真实反映撞击信号能量，通过其评估煤样损伤与量化能量释放，能有效表征煤柱内部能量释放特征及裂纹扩展行为．由图8可知，应力加载至19 MPa，即试样在由三向六面转为双向四面加载时，应力产生小幅度降低现象且系统采集到的绝对能量出现了明显大幅度突增，表明试样应力状态改变时内部发生能量释放，煤体裂隙同步扩展．绝对能量的最大值均发生于循环加卸载应力-应变曲线最高点，表明试样在应力扰动下能量不断积蓄耗散直到能量积聚达到冲击临界值，释放高强度能量，同时伴随着试样的大面积破碎和煤块体的冲出．

对比分析图8中5组不同煤阶试样循环加卸载应力-应变-绝对能量曲线发现，煤样绝对能量主要分布在应力-应变曲线峰前．主要原因在于峰后阶段试样两侧临空使得试样中心位置煤块受力挤压弹出，导致中心位置塑性区比例增大，难以进一步产生裂隙和释放能量，仅高阶试样在低频高幅循环加卸载中，因煤块错位，峰后阶段声发射探头可采集到少数不低于10^{-10} J的能量信号．从图8c～8e可以看出试样在不同强度应力扰动作用下能量释放情况均有所差异，低频高幅循环加卸载作用下绝对能量较大值产生于试样破坏冲出之后；中频中幅时5×10^{-10} J以上绝对能量较大值产生于临空和破坏冲击2个节点，此阶段中存在大量2×10^{-10} J以上能量释放；高频低幅时绝对能量在冲击发生时刻达到峰值7.85×10^{-10} J且远大于剩余绝对能量．结合上述3种应力扰动情况可得出：1)扰动幅度过大时，试样冲击破坏后仍会释放能量；2)频率与幅度适中时，双面临空试样在冲击破坏前即持续发生大裂纹扩展，并伴随大量能量释放；3)频率过大时，煤体在循环过程中仅释放部分能量，主要能量集中于大变形时刻释放．通过图8中高速运动相机拍摄的图片可以发现，试样的大面积破碎现象产生于从三向六面转为双向四面应力加载状态及循环加卸载至破坏2个节点．其中在试样产生剪切破坏且伴随有煤块冲出时绝对能量值较高，而试样发生冲击破坏后断裂煤块主要受重力作用掉落而无能量伴随释放．

为研究应力扰动强度对不同煤阶煤的破坏影响，从破坏机理角度对比分析不同条件循环加卸载

下试样冲击破坏时刻的形态特征，如表2所示．双面临空循环加卸载条件下，随煤阶升高，试样破坏模式由低阶的大范围颗粒弹射逐渐过渡为高阶的块体层理式抛出．在层理处拉伸裂纹晚于剪切裂纹出现，导致试样破坏模式多为粉碎状．随着循环加卸载方向的改变，其块体冲击破坏形式也有所变化．



(a) 低阶(0.1 Hz, 6 MPa)　(b) 中阶(0.1 Hz, 6 MPa)

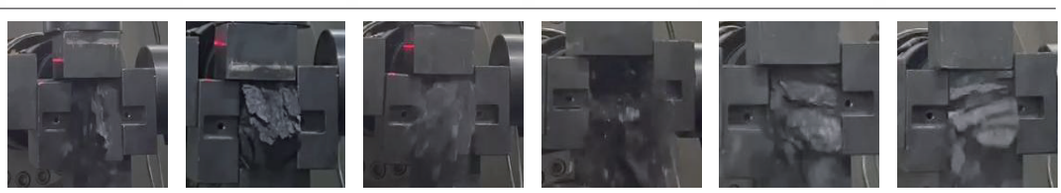
(c) 高阶 (0.3 Hz, 4 MPa)　(d) 高阶 (0.5 Hz, 2 MPa)　(e) 高阶 (0.1 Hz, 6 MPa)

图 8　不同煤阶煤样应力-应变-声发射能量规律特征

Fig. 8　Characteristics of stress-strain-acoustic emission energy in coal samples of different ranks

表 2　不同循环加卸载方向下煤样破坏形式

Table 2　Failure of coal samples under different cyclic loading-unloading directions

循环加卸载方案	X方向循环加卸载			Z方向循环加卸载		
	低阶	中阶	高阶	低阶	中阶	高阶
低频高幅						
高频低幅						

X向循环加卸载时，水平应力诱发层理张拉并抑制剪切裂纹产生，导致3种试样破坏时煤块抛出轨迹均偏向侧向，破坏剧烈程度略低于Z向．在Z向和X向循环加卸载条件下，中高阶试样中存在明显的层理式煤块掉落，循环加卸载为X向时破碎煤块体积小于Z向．表明煤样层理接近轴向时，破坏沿自身层理发生，且煤体层理方向与应力扰动方向的相互作用会影响试样破坏形态，在高应力扰动下处于双面临空状态下的煤样强度越低，其破坏抛出煤块体积越小且残余煤体完整度越低．

3.2　声发射特征分析

为研究应力路径改变后不同强度荷载扰动条件下的煤柱破坏及能量演变特征，本文对试样破坏过程中声发射信号进行收集．声发射参数(RA和AF)能够有效反映出岩石破坏的裂纹类型[31]．AF值较高而RA值较低时，则认为试样破坏形式为张拉破坏并伴随有张拉裂纹；若AF和RA值与

上述情况相反，此时试样发生剪切破坏，产生剪切裂纹，具体参数分类如图 9 所示．该方法常被用于分析岩石的微裂纹演化过程[32-33]．声发射参数的数值可用下式计算：

$$A_F=\frac{C_r}{t_d}, \tag{1}$$

$$R_A=\frac{t_r}{A}, \tag{2}$$

式中：A_F 和 R_A 为声发射参数；C_r 为振铃计数；t_d 为持续时间，s；t_r 为上升时间，s；A 为幅值，dB，声发射门槛设为 40 dB．

为了进一步说明试样的破坏形式，通过计算试样的 R_A-A_F 值得到其参数分布，进而绘制中阶煤样高频低幅逐级循环下的煤样散点密度分布图及宏观破坏特征图，如图 9 所示．图中对声发射信号值密度进行颜色区分便于表征破坏和裂纹的占比，以各颜色代表密度数值大小，用以判断试样破坏模式，同时设置 $k_{max}=A_F/R_A=2.3$ 为判定张拉裂纹和剪切裂纹的阈值[34]．

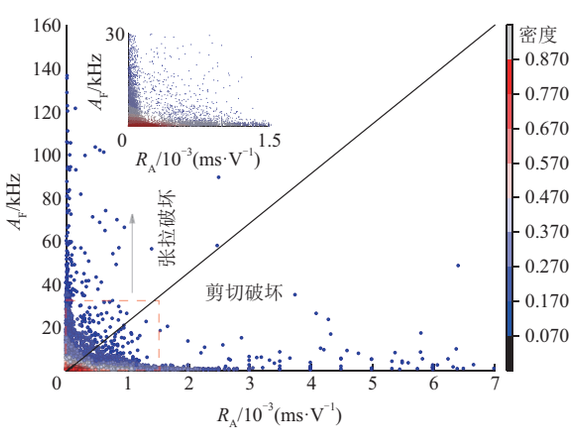


图 9 煤样 R_A-A_F 散点密度分布

Fig. 9 Scattered density distribution of R_A-A_F for coal samples

由图 9 可知，在逐级循环加卸载试验中，试样的 AF 值主要分布在 0～140 kHz，RA 值主要分布在 0～0.007 ms/V，声发射有效事件数为 26 357 个，靠近坐标原点的散点分布较为密集，以红色区域为主，远离坐标原点的散点分布较为稀少，以蓝色为主．

根据 R_A-A_F 的分布特征分析可知，试样的数据点主要分布在剪切区域，故试样内部产生较多的剪切微裂纹，试样最终破坏模式以剪切破坏为主，与表 2 中试样的最终破坏形态保持一致．从试样受力角度分析，在试样两侧临空后 σ_3 为 0，最大主应力 σ_1 方向受到循环加卸载作用且 σ_2 对试样水平向有限制作用，导致试样内部剪应力超过其抗剪强度，形成较多的剪切裂纹．基于密度分布局部放大图中密度较大值分布位置由张拉区域向剪切区域过渡现象，说明双面临空条件下煤样受应力扰动其破坏演化过程为张拉破坏-张剪破坏-剪切破坏．

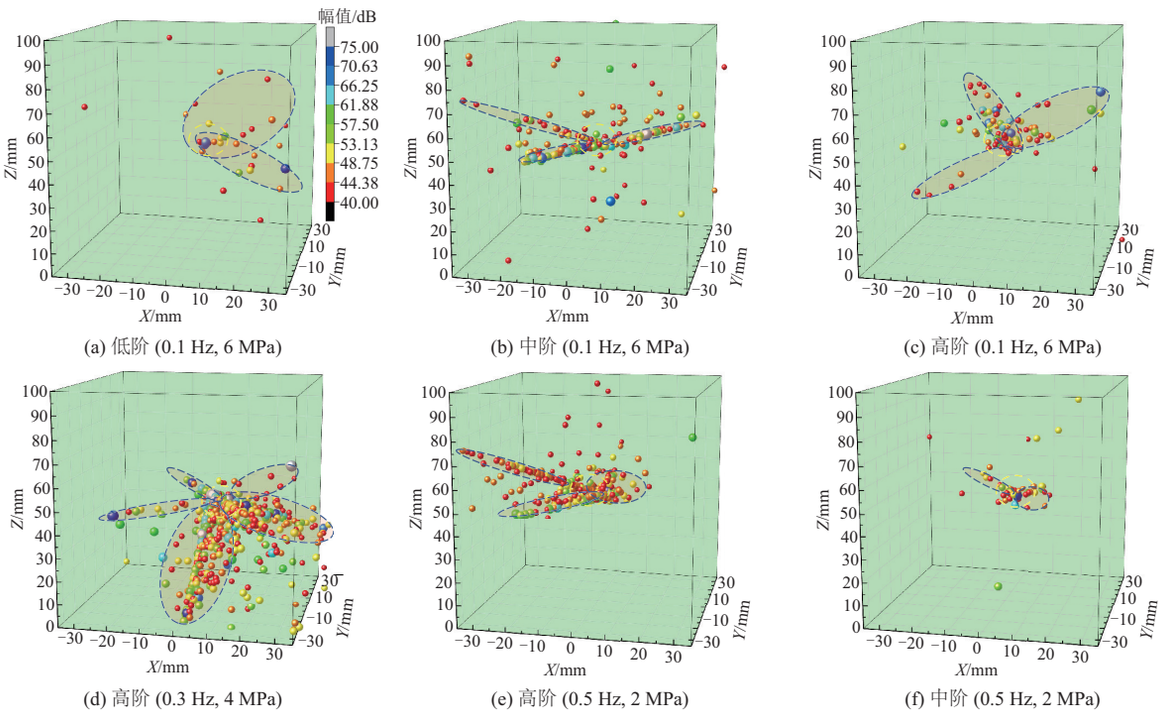
基于声发射空间定位对煤体破坏冲击孕育阶段中裂纹的空间分布和演化规律进一步分析，3 种试样的声发射能量空间定位图如图 10 所示．声发射事件坐标表示微裂纹在试样内部的空间位置，不同颜色表征声发射事件点源幅值大小，红、黄、绿、蓝依次代表了声发射事件幅值由低到高的程度．

由图 10a 可知，当加载方式为低频高幅时，声发射事件数较少、幅值较低，在试样内部呈散乱分布，此时煤体内无明显损伤．如图 10b 所示，当循环加卸载频幅保持不变条件下试样煤阶由低阶升至中阶后，试样内部事件数显著增加，幅值大于 60 dB 的声发射事件数增多，在试样内部分布范围扩大，部分 AE 事件在靠近临空面位置集聚并呈线型分布，上述现象表明试样内部旧裂隙开始发育且产生新裂隙，靠近试样临空面位置有煤块冲出，损伤进一步增加．对比图 10a～10c 不同煤阶试样声发射空间定位图发现，在循环加卸载频率幅度均一致时，AE 事件数随煤阶升高呈先增大后减少的趋势．低阶试样由于自身强度较弱其破坏彻底且快速，声发射信号不易采集故无明显 AE 事件演变轨迹．由表 1 中常规三轴试验结果可知中阶试样其自身黏聚力和内摩擦角较低，试样裂隙处煤颗粒易发生相互滑动产生微弱能量信号导致煤体内部 AE 事件数大幅度增加．高阶试样也有声发射信号朝临空面延伸的趋势，但 AE 事件数比中阶试样少．

考虑低阶试样强度较低难以通过声发射信号表征煤样破坏，故选取 3 种应力扰动下的高阶试样声发射定位图进行对比分析，如图 10c～10e 所示．对比 3 种频幅发现，在中频中幅时试样内部的声发射信号数值和数量最为可观，试样内部 AE 事件数大量增加且高于 50 dB 的事件数的占比较高，出现了强烈的信号群，形成多个成核区，从 AE 分布特征可知裂隙沿试样法向及切向方向发育较为成熟，说明较高的应力扰动幅值和频率叠加会加速试样中裂隙的产生和发展，增大煤体冲击的可能性，即应力幅值和频率 2 种应力扰动因素均对试样内部能量释放有正向促进作用．对图 10c，10d 进行对比分析可知，频率增加后 AE 事件数量显著增加；幅值增加后 AE 事件幅值峰值增加．进一步表

明应力频率和幅值对试样破坏特征的促进作用分别倾向于增加微裂纹数量和扩展煤体破裂．基于煤样自身易碎特性使得 AE 信号难以收集，图 10a～10e 中多数煤样信号定位图都具有显著的沿着临空侧发展的轨迹，因此不同强度应力扰动下煤样的细观破裂贯通和宏观破坏仍遵守沿着临空面发展的规律，声发射信号源定位与试样破坏形态图吻合，揭示双面临空条件下煤样的破坏同样也是由内部孕育再向临空面发展．

基于上述分析可知，单向双面临空煤柱冲击破坏过程中的裂隙发育具有一定的规律性，其主要受煤体煤阶、应力扰动强度和频率三者影响．两侧临空状态下的煤样受高强度应力扰动，声发射能量信号均会从加载前期随机分布演变至临空面集聚，其自组织行为引导煤体内的微小孔隙和裂纹扩展．因此，单向双面临空煤柱在应力扰动下由裂缝扩展到煤块碎裂弹射的变化是一个由无序稳定态走向有序非稳定态的自组织临界过程．



(a) 低阶 (0.1 Hz, 6 MPa)　(b) 中阶 (0.1 Hz, 6 MPa)　(c) 高阶 (0.1 Hz, 6 MPa)

(d) 高阶 (0.3 Hz, 4 MPa)　(e) 高阶 (0.5 Hz, 2 MPa)　(f) 中阶 (0.5 Hz, 2 MPa)

图 10　声发射空间定位图

Fig. 10　Spatial localization map for acoustic emission

4　能量密度演化定量分析

煤体在循环加卸载条件下其能量演化过程主要是输入、耗散和释放几个阶段，应力扰动形式的改变会影响试样内部的能量变化规律．基于此分析试样的损伤演化规律，有利于进一步探究能量驱动下单向双面临空煤柱破坏特征．

根据热力学定律可知：

$$u=u^{\mathrm{d}}+u^{\mathrm{e}}, \tag{3}$$

式中：u 为输入能密度；u^{d} 为耗散能密度；u^{e} 为弹性能密度．

因此，真三轴加载初始应力过程中试样的输入能密度计算公式[36]为

$$u_1^{\mathrm{e}}=\int_0^{\varepsilon'_1}\sigma'_1\mathrm{d}\varepsilon'_1+\int_0^{\varepsilon'_2}\sigma'_2\mathrm{d}\varepsilon'_2+\int_0^{\varepsilon'_3}\sigma'_3\mathrm{d}\varepsilon'_3, \tag{4}$$

式中：u_1^{e} 为试样加载至初始应力环境阶段的输入能密度；$\varepsilon'_1,\varepsilon'_2,\varepsilon'_3$ 为最大、中间和最小主应力方向上试样产生的应变；$\sigma'_1,\sigma'_2,\sigma'_3$ 为最大、中间和最小主应力．

保压初始应力环境一段时间后，最大主应力方向进行逐级循环加卸载，此时产生的输入密度计算公式为

$$u_2^{\mathrm{e}}=\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_{12}}\sigma'_1\mathrm{d}\varepsilon_1+\sigma'_2(\varepsilon_{21}-\varepsilon_2), \tag{5}$$

式中：$\varepsilon_{12},\varepsilon_{21}$ 为应力环境保持后在最大主应力方向上继续施加荷载时，2 个应力方向上的应变．

最小主应力瞬间卸荷形成临空面过程释放弹性能密度公式为

$$u_{31}^{\mathrm{e}}=\int_{\varepsilon_3}^{\varepsilon_{31}}\sigma'_3\mathrm{d}\varepsilon_3, \tag{6}$$

式中：ε_{31} 为 σ'_3 卸荷至零时其方向上产生的应变，u_{31}^{e} 为试样卸荷至临空所释放的弹性能密度．

根据本文循环加卸载试验方案，其中间主应力方向在此过程也存在应力卸荷所引起的少量弹性能密度释放，释放弹性能密度的计算公式为

$$u_{32}^{e}=\int_{\varepsilon_{21}}^{\varepsilon_{22}}\sigma'_{2}\mathrm{d}\varepsilon_{2}, \tag{7}$$

式中：ε_{22}为σ'_{2}卸荷时其方向上产生的应变；u_{32}^{e}为中间主应力缓慢卸荷所释放的弹性能密度.

试样释放的总弹性能密度为

$$u_{3}^{e}=u_{32}^{e}+u_{31}^{e}. \tag{8}$$

试样总输入能密度为

$$u=u_{1}^{e}+u_{2}^{e}. \tag{9}$$

双面临空条件下试样的耗散能密度为

$$u^{d}=u-u_{3}^{e}. \tag{10}$$

基于上述计算公式对试样各个应力方向上的应力-应变曲线进行积分，能量密度示意如图11所示.

为探究循环加卸载频率、幅值及作用方向对试样能量密度的影响，分析了不同煤阶试样的能量密度，得到2种循环加卸载方向下的能量密度曲线，并与静载条件进行对比，如图12所示.

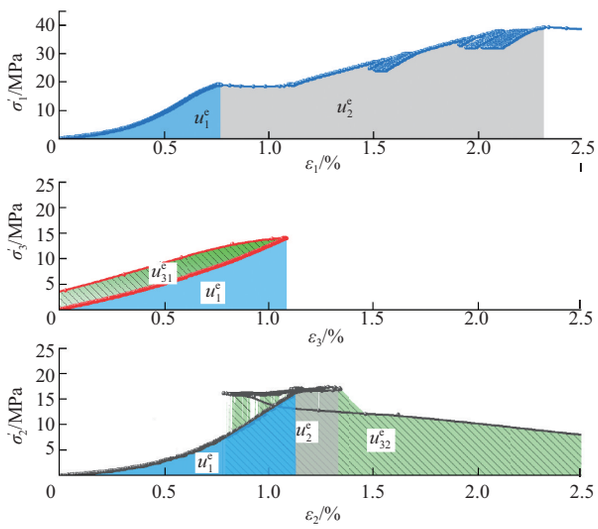
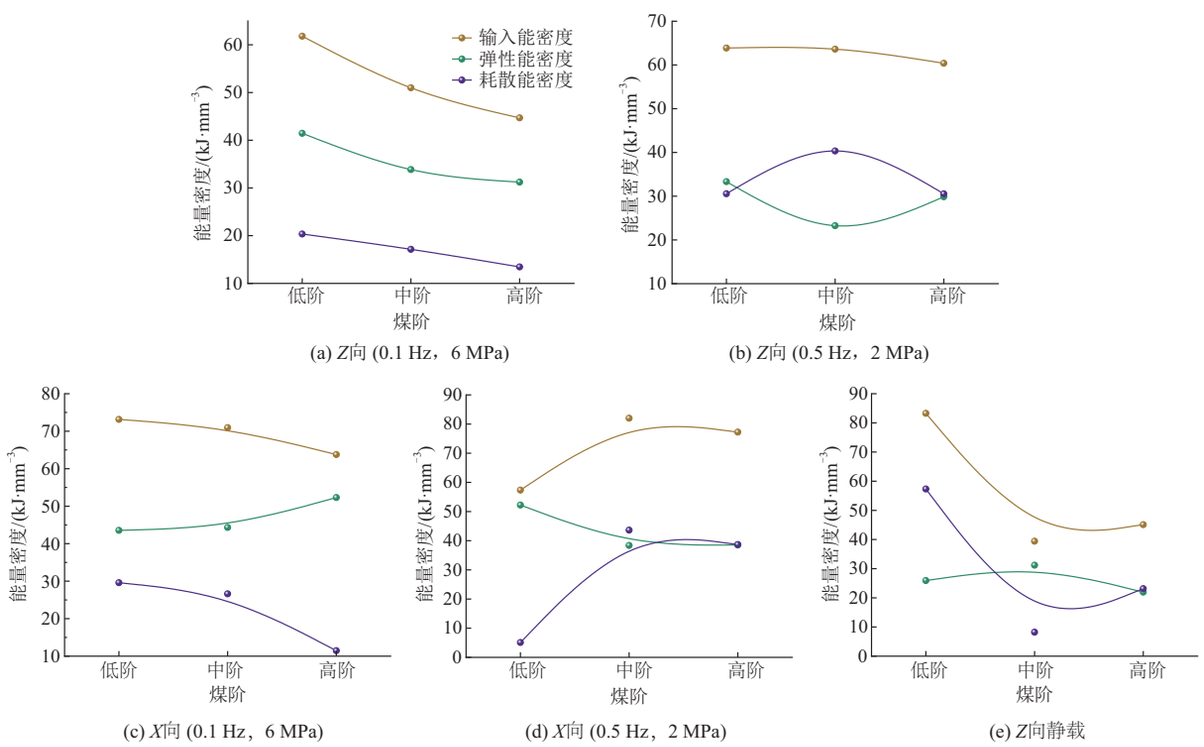


图11　煤样加卸载全过程各阶段能量密度示意

Fig. 11　Schematic diagram of energy at each stage in the entire loading-unloading process of coal samples



(a) Z向 (0.1 Hz，6 MPa)　(b) Z向 (0.5 Hz，2 MPa)

(c) X向 (0.1 Hz，6 MPa)　(d) X向 (0.5 Hz，2 MPa)　(e) Z向静载

图12　不同煤阶煤样真三轴循环加卸载能量密度曲线

Fig. 12　True triaxial cyclic loading and unloading energy density curves for different ranks of coal samples

图12a，12c中输入能和耗散能随煤阶提高其能量密度降低且近似成线性，说明在相同应力扰动条件下试样自身变质程度对其能量积聚和耗散的影响是线性的. 从煤体结构特征角度看，当煤阶增大时试样本身完整度和塑性变形能力提高，受应力扰动后其试样内部的耗散能降低. 由图12a，12c可知，在循环加卸载方向由Z改为X向时，其弹性能密度由30～41 kJ/mm^{3}提高至42～52 kJ/mm^3，增幅约为10 kJ/mm^3，图12b，12d中高频低幅条件下弹性能密度同样得到了提高，表明水平向的应力扰动可能导致试样内部的微裂纹扩展. 考虑X向循环加卸载高阶试样的能量密度异常情

况，分析图 12a～12d 密度曲线可知，循环加卸载方向的改变对能量密度减少趋势有低程度的减缓作用．对比图 12a，12c 和 12b，12d 这 2 种应力条件下的能量密度曲线可知，在应力扰动频率大幅度提高情况下，煤样的能量演化规律产生显著改变．图 12b，12d 中，中阶和高阶试样的耗散能密度占输入能密度比例均超过弹性能密度．说明高阶试样在高频应力扰动下，应力加载阶段内部新裂纹的扩展易与旧裂纹连接形成大裂纹．基于中阶煤体的力学参数特性，其不易因摩擦产生能量耗散，这表明高频率应力会作用于煤体内部颗粒，使其发生相对运动，导致试件内部摩擦加剧并产生大量能量耗散．

由图 12e 可知，静载条件下输入能密度与耗散能密度随煤阶增加呈先减小后增大的趋势．对比 Z 向低频高幅循环加卸载曲线可见，中阶试样的耗散能密度相较于其他煤阶试样均呈降低趋势，且静载条件下的降低趋势更显著，这再次验证了煤样抗剪强度指标过小时不易产生能量耗散．结合频率对煤样耗散能的影响可知，与静载相比，循环加卸载增加了施加在煤样上的应力频次，更易促使难以扩展的孔隙与裂纹充分发育．

5　结　论

1）基于常规单轴和三轴压缩试验可知煤样强度与煤阶成正比例关系，煤样抗剪强度指标随煤阶提高呈先减小后增大变化．单向双面临空状态下低阶煤样更易发生冲击破坏，且煤阶越低煤样弹射的煤块体积越小、破坏程度越严重．不同初始垂直应力条件下煤样变形特征主要受抗剪强度指标影响，煤样煤阶与脆性特征呈线性关系，初始垂直应力增大条件下煤样破坏逐渐趋于延性．

2）竖向施加循环加卸载与静载 2 种应力扰动较于水平向施加其煤样破坏所需临界应力更低，煤样破坏形式更剧烈．应力扰动施加方向为竖向时煤样表现为层理式破坏，循环加卸载对煤样冲击破坏诱发作用大于静载．

3）循环加卸载幅度和频率均对煤样的损伤破坏起正向促进作用，两者分别主导煤体内部释放能量值和能量事件数．两侧卸荷形成临空面的煤样受动载应力扰动从初始张拉破坏过渡到张剪破坏最后以剪切破坏为主，其中能量演变过程是先积聚于煤样中心然后向临空面呈规律的冲击演化．

4）真三轴双面临空循环加卸载下煤样的输入能密度和耗散能密度随煤阶呈非线性演化规律且两者规律保持一致．中高阶煤样在高频应力扰动下其内部会耗散更多能量，应力扰动频率增大和应力扰动形式由静载转为动载均促进煤样的能量密度耗散．

参考文献：

[1] 康红普．煤炭开采与岩层控制的空间尺度分析[J]．采矿与岩层控制工程学报，2020，2(2)：5-30．
KANG Hongpu. Spatial scale analysis on coal mining and strata control technologies[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering，2020，2(2)：5-30．

[2] 乔　伟，程香港，窦林名，等．深部矿井覆岩沉积环境-力学特性及冲击地压风险判识[J]．煤田地质与勘探，2024，52(10)：60-71．
QIAO Wei，CHENG Xianggang，DOU Linming，et al. Sedimentary geomechanical properties of overburden and rock burst risk identification in deep mines[J]. Coal Geology & Exploration，2024，52(10)：60-71．

[3] 张　博，郝兵元，任兴云．倾斜特厚煤层区段煤柱尺寸及分区围岩控制研究[J]．采矿与安全工程学报，2024，41(2)：232-241．
ZHANG Bo，HAO Bingyuan，REN Xingyun. Investigating coal pillar size in district sublevel andregional surrounding rock controlling in inclined extra - thick coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2024，41(2)：232-241．

[4] 王国法，潘一山，赵善坤，等．冲击地压煤层如何实现安全高效智能开采[J]．煤炭科学技术，2024，52(1)：1-14．
WANG Guofa，PAN Yishan，ZHAO Shankun，et al. How to realize safe-efficient-intelligent mining of rock burst coal seam[J]. Coal Science and Technology，2024，52(1)：1-14．

[5] 袁　亮．我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]．煤炭学报，2016，41(1)：1-6．
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society，2016，41(1)：1-6．

[6] 袁　亮．煤炭精准开采科学构想[J]．煤炭学报，2017，42(1)：1-7．
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining [J]. Journal of China Coal Society，2017，42(1)：1-7．

[7] 张　勇，孙晓明，郑有雷，等．深部回采巷道防冲释能耦合支护技术及应用[J]．岩石力学与工程学报，2019，38(9)：1860-1869．

ZHANG Yong, SUN Xiaoming, ZHENG Youlei, et al.An anti-punching and energy-releasing coupling support technology in deep mining roadway and its application[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(9):1860-1869.

[8] 侯 彪,王子升,周艺璇,等.不同煤阶煤制生物甲烷的代谢功能差异性研究[J].煤炭科学技术,2021,49(12):119-126.
HOU Biao,WANG Zisheng,ZHOU Yixuan,et al.Difference of metabolic functions in biomethane produced from different rank coals[J].Coal Science and Technology,2021,49(12):119-126.

[9] 张小东,冀海军,亢红东,等.超临界CO_2流体作用对不同煤阶煤有机组成和结构的影响机制[J].中国矿业大学学报,2025,54(1):52-64.
ZHANG Xiaodong, JI Haijun, KANG Hongdong, et al. Influence mechanisms of $ScCO_2$ action on the organic compositionand structure of different rank coals [J].Journal of China University of Mining & Technology,2025,54(1):52-64.

[10] 孙粉锦,杨焦生,王玫珠,等.不同煤阶煤应力敏感特征及其控制机理[J].煤田地质与勘探,2022,50(9):51-58.
SUN Fenjin, YANG Jiaosheng, WANG Meizhu, et al.Stress sensitivity characteristics and control mechanism of different coal rank reservoirs[J].Coal Geology & Exploration,2022,50(9):51-58.

[11] 秦 雷,王伟凯,林海飞,等.低温循环冻融过程不同煤阶煤体传热-变形特征分析[J].中国矿业大学学报,2024,53(4):737-750.
QIN Lei, WANG Weikai, LIN Haifei, et al. Heat transfer and deformation characteristics of different rank coals in low-temperature cyclical freeze-thaw process[J].Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(4):737-750.

[12] KLAWITTER M, ESTERLE J, COLLINS S. A study of hardness and fracture propagation in coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2015,76:237-242.

[13] RANATHUNGA A S, PERERA M S, RANJITH P G, et al.Effect of coal rank on CO_2 adsorption induced coal matrix swelling with different CO_2 properties and reservoir depths[J].Energy & Fuels, 2017, 31(5):5297-5305.

[14] MENG J Q, LYU C H, WANG J, et al.Mechanical properties and failure mechanisms of different rank coals at the nanoscale[J].Fuel,2023,345:128209.

[15] KHADIVI B, MASOUMI H, HEIDARPOUR A, et al. Mechanical characterization of intact rock under polyaxial static-dynamic stress states[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2025,185:105977.

[16] TAHERI A, SQUIRES J, MENG Z, et al.Mechanical properties of brown coal under different loading conditions[J].International Journal of Geomechanics, 2017,17(11):06017020.

[17] 涂 敏,赵庆冲,张向阳,等.不同加载速率下煤岩动力破坏特征实验研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):1031-1042.
TU Min,ZHAO Qingchong,ZHANG Xiangyang,et al.Experimental study on dynamic failure characteristics of coal and rock under different loading rates[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5):1031-1042.

[18] 鲁 俊,尹光志,高 恒,等.真三轴加载条件下含瓦斯煤体复合动力灾害及钻孔卸压试验研究[J].煤炭学报,2020,45(5):1812-1823.
LU Jun, YIN Guangzhi, GAO Heng, et al. Experimental study on compound dynamic disasterand drilling pressure relief of gas-bearing coal under true triaxial loading[J].Journal of China Coal Society,2020, 45(5):1812-1823.

[19] 张俊文,范文兵,宋治祥,等.真三轴不同应力路径下深部砂岩力学特性[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):106-114.
ZHANG Junwen, FAN Wenbing, SONG Zhixiang, et al.Mechanical characteristics of deep sandstone under different truetriaxial stress paths[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(1):106-114.

[20] 杨 科,刘文杰,马衍坤,等.真三轴单面临空下煤岩组合体冲击破坏特征试验研究[J].岩土力学,2022,43(1):15-27.
YANG Ke, LIU Wenjie, MA Yankun, et al. Experimental study of impact failure characteristics of coal-rock combination bodies under true triaxial loading and single face unloading[J].Rock and Soil Mechanics,2022,43(1):15-27.

[21] 张晨阳,潘俊锋,夏永学,等.真三轴加卸载条件下组合煤岩冲击破坏特征研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(8):1522-1533.
ZHANG Chenyang, PAN Junfeng, XIA Yongxue, et al. Research on impact failure characteristics of coal-rock combination bodies under true triaxial loading and unloading conditions[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(8):1522-1533.

[22] 马衍坤,李笑笑,翟少彬,等.含预制钻孔煤体承载破坏应变场与声发射响应真三轴试验[J].中国矿业

大学学报，2024，53(3)：497-508.
MA Yankun，LI Xiaoxiao，ZHAI Shaobin，et al.The true triaxial test of strain field and acoustic emission response ofbearing failure of coal with prefabricated borehole[J].Journal of China University of Mining & Technology，2024，53(3)：497-508.

[23] 焦振华，姜耀东，赵毅鑫，等.侧限约束冲击载荷下煤样能量耗散与损伤特征[J].中国矿业大学学报，2023，52(3)：492-501.
JIAO Zhenhua，JIANG Yaodong，ZHAO Yixin，et al. Energy dissipation and damage characteristics of lateral-restraint coalunder impact load [J]. Journal of China University of Mining & Technology，2023，52(3)：492-501.

[24] AKDAG S，KARAKUS M，NGUYEN D G .Experimental investigation of burst failure mechanism under polyaxial loading conditions[J].Rock Mechanics and Rock Engineering，2025，58(4)：1-16.

[25] ZHAO Q，TU M，FU B，et al.Acoustic emission and failure characteristics of coal and rock under single-free-face true triaxial loading[J].Engineering Failure Analysis，2024，161：108299.

[26] MINKE D，CHANGBAO J，WENMING Y，et al. Experimental study on mechanical and damage characteristics of coal under true triaxial cyclic disturbance [J].Engineering Geology，2021，295：106445.

[27] 段敏克，蒋长宝，郭现伟，等.真三轴循环载荷作用下煤岩力学及损伤特征试验研究[J].岩石力学与工程学报，2021，40(6)：1110-1118.
DUAN Minke，JIANG Changbao，GUO Xianwei，et al. Experimental study on mechanical and damage characteristics of coal under cyclic true triaxial loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2021，40(6)：1110-1118.

[28] 牛滕冲，王方田，王文林，等.区段煤柱聚能失稳关键因素及控制技术[J].采矿与岩层控制工程学报，2022，4(2)：24-34.
NIU Tengchong，WANG Fangtian，WANG Wenlin，et al.Key factors and control technology of energy-gathered instability of coal pillar[J].Journal of Mining and Strata Control Engineering，2022，4(2)：24-34.

[29] 宋常胜，王　文，刘　凯，等.真三轴动静组合加载饱水煤样能量耗散特征[J].煤炭学报，2022，47(5)：2011-2026.
SONG Changsheng，WANG Wen，LIU Kai，et al. Energy dissipation characteristics of watersaturated coal samples under true triaxialdynamic and static combined loading [J].Journal of China Coal Society，2022，47(5)：2011-2026.

[30] 王　博，姜福兴，朱斯陶，等.陕蒙接壤深部矿区区段煤柱诱冲机理及其防治[J].采矿与安全工程学报，2020，37(3)：505-513.
WANG Bo，JIANG Fuxing，ZHU Sitao，et al.Mechanism and prevention of rock burst induced bysegment pillars in the deep mining areas of Shaanxi-lnner Mongolia adjacent regions[J].Journal of Mining & Safety Engineering，2020，37(3)：505-513.

[31] AGGELIS D G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters[J].Mechanics Research Communications，2011，38(3)：153-157.

[32] LIU C Y，ZHAO G M，XU W S，et al.Experimental study on failure characteristics of single-sided unloading rock under different intermediate principal stress conditions[J].International Journal of Mining Science and Technology，2023，33(3)：275-287.

[33] 肖晓春，刘海燕，丁　鑫，等.单向卸载条件下组合煤岩力学特性及声发射演化规律[J].煤炭科学技术，2023，51(11)：71-83.
XIAO Xiaochun，LIU Haiyan，DING Xin，et al.Mechanical properties and acoustic emission evolution of coal-rock combination under unidirectional unloading condition[J].Coal Science and Technology，2023，51(11)：71-83.

[34] YUE J G，KUNNATH S K，XIAO Y.Uniaxial concrete tension damage evolution using acoustic emission monitoring[J].Construction and Building Materials，2020，232(1)：117281.

[35] 谢和平，鞠　杨，黎立云.基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J].岩石力学与工程学报，2005(17)：3003-3010.
XIE Heping，JU Yang，LI Liyun.Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy release principles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005(17)：3003-3010.

[36] 王　刚，郑金叶，刘义鑫，等.高温后砂岩真三轴加卸载力学特性演化规律研究[J].煤炭科学技术，2025，53(2)：124-136.
WANG Gang，ZHENG Jinye，LIU Yixin，et al.Study on the evolution of true triaxial unloading mechanical properties of sandstone after high temperature [J]. Coal Science and Technology，2025，53(2)：124-136.

（责任编辑　沈　菊　仝　腾）