侧向约束下加载系统刚度对砂岩非稳定破坏模式与能量 演化的影响

赵光明^{1,2,3}, 吴旭坤^{1,2}, 许文松^{1,3}, 刘之喜^{1,2}, 刘崇岩^{1,4}, 张启航^{1,2}, 周 俊⁵

(1. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽 淮南 232001;2. 安徽理工大学 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. 安徽理工大学 安全科学与工程学院,安徽 淮南 232001;4. 安徽理工大学 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心, 安徽 淮南 232001;5. 江汉大学 精细爆破国家重点实验室,湖北 武汉 430056)

摘 要:为探究加载系统刚度对岩石破坏模式及能量演化规律的影响,利用自主研发的刚性与变刚 度试验系统开展双轴压缩试验,分析侧向约束作用下加载系统刚度对岩石峰后非稳态破坏及能量 释放规律的作用机制。结果表明:从能量耗散与释放角度来分析岩样与试验机系统之间的相互作 用,揭示了加载系统刚度下岩石破坏过程中能量耗散与释放的关系,并将其划分为稳定破坏(Wa> $W_{u} + W_{e}$ 、临界状态 ($W_{d} = W_{u} + W_{e}$)及不稳定破裂 ($W_{d} < W_{u} + W_{e}$)3 种模式;在低刚度条件下,岩样的 应力应变曲线表现出显著的应力跌落与起伏,呈现局部非稳态破坏,而在高刚度条件下,岩样的 峰后应力缓慢下降,曲线呈台阶状并存在残余阶段;随着加载系统刚度的增大,岩样的最大应变 能释放量和最大耗散能均呈非线性减少,而侧向约束力的增加则导致最大应变能释放量和最大耗 散能的非线性增加;侧向约束的施加增强了刚度回弹效应,改变了岩石破裂时的能量释放模式, 在峰后前期 ($\Delta W_{pe} > \Delta W_{pd}$),能量释放较为迅速,峰后中期 ($\Delta W_{pe} < \Delta W_{pd}$),能量主要以耗散为主, 峰后后期 ($\Delta W_{
m pe}pprox\Delta W_{
m pd}$),能量释放和耗散进入稳定阶段。研究结果为理解加载系统刚度对岩石峰 后破坏机制及动力灾害防治提供了理论基础,并提出通过侧向约束力、分阶段能量控制和降低岩 体储能能力等措施、以改善能量释放模式、增强能量耗散、提升巷道围岩稳定性。 关键词:加载系统刚度;侧向约束力;能量释放与耗散;峰后应力;非稳态破坏模式 中图分类号: 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2025)02-0877-13

Influence of loading system stiffness on unstable failure mode and energy evolution of sandstone under lateral constraints

ZHAO Guangming^{1, 2, 3}, WU Xukun^{1, 2}, XU Wensong^{1, 3}, LIU Zhixi^{1, 2}, LIU Chongyan^{1, 4}, ZHANG Qihang^{1, 2}, ZHOU Jun⁵

(1. Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining, Ministry of Education of China, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. National Key Laboratory of Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 4. National and local joint engineering research center for coal safety and precision mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 5. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, China)

收稿日期: 2024-06-20 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0702
 基金项目: 安徽省高校优秀科研创新团队资助项目 (2022AH010053); 国家重点研发计划资助项目 (2023YFC2907602);
 国家自然科学青年基金资助项目 (52404068)

- 作者简介: 赵光明 (1976—), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士生导师。E-mail: guangmingzhao@163.com
- 通讯作者:吴旭坤(1995—),男,河南驻马店人,博士研究生。E-mail: 1627154904@qq.com

引用格式:赵光明,吴旭坤,许文松,等.侧向约束下加载系统刚度对砂岩非稳定破坏模式与能量演化的影响[J].煤炭 学报,2025,50(2):877-889.

ZHAO Guangming, WU Xukun, XU Wensong, et al. Influence of loading system stiffness on unstable failure mode and energy evolution of sandstone under lateral constraints[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 877–889.



移动阅读

Abstract: In order to explore the influence of the stiffness of the loading system on rock failure mode and energy evolution law, the self-developed rigidity and variable stiffness test system is used to carry out biaxial compression tests, and the mechanism of the loading system stiffness on the post-peak unsteady failure and energy release law of rock under lateral constraints is analyzed. The results show that: The interaction between the rock sample and the testing machine system is analyzed from the perspective of energy dissipation and release, revealing the relationship between these factors during the rock failure process under the stiffness of the loading system. It can be divided into three modes: stable failure ($W_d > W_u +$ $W_{\rm e}$), critical state ($W_{\rm d} = W_{\rm u} + W_{\rm e}$), and unstable failure ($W_{\rm d} < W_{\rm u} + W_{\rm e}$). Under low stiffness conditions, the stress-strain curve of the rock sample shows significant stress drop and fluctuation, indicating local unsteady failure. In contrast, under high stiffness conditions, the post-peak stress of the rock sample decreases gradually, and the curve is stepped with a residual stage. With the increase of the stiffness of the loading system, the maximum strain energy release and maximum dissipative energy of the rock sample decrease nonlinearly, while the increase of the lateral binding force leads to the nonlinear increase of the maximum strain energy release and maximum dissipative energy. The application of lateral constraints strengthens the stiffness rebound effect and changes the energy release mode when the rock is fractured. In the early stage after the peak ($\Delta W_{\rm pe} > \Delta W_{\rm pd}$), the energy release is relatively rapid. In the middle stage after the peak ($\Delta W_{\rm pe} < \Delta W_{\rm pd}$), the energy is mainly dissipated. In the late stage after the peak $(\Delta W_{pe} \approx \Delta W_{pd})$, the energy release and dissipation enter a stable stage. The research results provide a theoretical basis for understanding the post-peak failure mechanism of the loading system stiffness and dynamic disaster prevention, and propose measures such as lateral binding, phased energy control and reducing the energy storage capacity of the rock mass to improve the energy release mode, enhance energy dissipation, and enhance the stability of the surrounding rock of the roadway.

Key words: stiffness of loading system; lateral binding force; energy release and dissipation; post-peak stress; unsteady failure mode

0 引 言

岩体在承受荷载时的力学行为及能量演化过程 一直是探讨的热点,在承受超过其强度极限的应力后, 进入峰后破坏阶段,此时岩体的破坏特征、破坏模式 以及伴随的能量演化过程显著不同于峰值前的非线 性弹性行为^[1-3],加载系统的刚度对岩体的破坏模式及 能量耗散路径产生重要影响,进而影响岩体的稳定性 和安全系数^[4]。因此,准确地理解和评价加载系统刚 度条件下岩体的峰后破坏行为和能量转换规律对巷 道围岩安全性和稳定性评价具有重要意义。

目前,众多学者针对岩石材料峰后破坏特征进行 了研究。在试验方面,张志镇等^[5]开展不同岩性固定 围压的轴向加卸载试验,获得了其弹性能和耗散能的 演化及分配规律;杨小彬等^[6]研究了不同加载方式下 峰后岩样损伤变形、破裂形态及能量演化特征; ZHANG等^[7]对不同成因的岩石在峰后强度表现的围 压影响进行了研究;TIWARI等^[8]基于三轴和真三轴 试验,分析了节理及围压对岩石峰后力学行为的影响。 在理论方面,岩石峰后破坏的脆性表征以应力跌落速 率^[9-10]、能量释放速率^[11-12]为主;宋洪强等^[13]研究表明 岩石的脆性是指其内部可释放弹性能在峰前阶段的 积累与峰后迅速释放的综合表征;张军等^[14]通过关联 峰前耗散能与峰后断裂能水平,提出了岩石破坏前后 力学特性的脆性评价指数;陈国庆等^[15]提出了一个综 合考虑峰前弹性能积累与峰后释放特性的岩石脆性 评价方法;赵毅鑫等^[16]则基于能量释放率,为不同赋 存深度的试样建立了适用的脆性指数;宋昊等^[17]提出 了一种基于岩石峰前能量演化及峰后侧向变形特征 的岩石脆性评价方法,建立岩石峰前脆性指 *B*_{pre} 及峰 后脆性指标 *B*_{post},将两者之积作为岩石脆性评价指标 *B*_m。然而,这些研究主要集中在岩石自身能量释放及 破坏特征上,未能充分考虑加载系统刚度对岩体破坏 过程的影响。

实际上,岩体的破坏不仅依赖于其自身的能量积 累,还受到外部环境能量输入的显著影响。顾金才院 士等^[18]发现围岩要发生岩爆,不仅需要岩爆体自身积 蓄能量,还要周围岩体对其能量进行补充,引起周围 岩体对岩爆体释放弹性能,发生失稳破坏;钱七虎^[19]、 ZHANG 等^[20]、XU 等^[21]指出仅靠岩体自身所储存的 能量难以诱发动力损伤,需要围岩向岩体提供能量; BLAKE^[22]研究发现岩体结构的刚度大于围岩加载系 统,破坏时储存在围岩加载系统中的应变能迅速释放 并施加到岩体结构上,导致岩爆发生;赵同彬等^[23]研 究试件破坏刚度准则及试验机储能-释能机制基础上, 提出了岩石力学试验机加载刚度伺服调控技术;尹延 春等^[24]研究了试验机-试件刚度比对煤体破坏特征及 冲击倾向性指数测试结果的影响,提出了考虑顶板刚 度和供能作用的巷帮冲击危险性评价指数。以上研 究表明,加载系统的刚度是影响岩体破坏模式的重要 因素,但目前对这一问题的研究仍显不足。

基于此,笔者将岩体和试验系统作为完整结构体 来分析,研究二者相互作用对岩体稳定性和破坏模式 的影响,从刚度和能量理论的角度,探讨了加载系统 刚度对岩体峰后破坏行为及能量演化规律的影响,明 确了刚度效应在岩体中的作用。考虑加载系统刚度 下岩石峰后破坏过程的能量耗散能与释放能关系,推 导出基于加载系统刚度下的岩石破坏程度指标,并利 用自主研发的刚性和可变刚度试验机系统,开展侧向 约束作用下加载系统刚度对岩石峰后破坏力学行为 试验进行了验证,研究结果对于巷道动力灾害的防控 具有重要意义。

岩石→试验机系统结构体相互作用机理 分析

BLAKE^[22]在探讨岩体结构的刚度与围岩加载系 统的刚度关系时,指出当围岩加载系统的刚度小于岩 体结构的刚度时,岩体结构更易发生失稳破坏,为准 确描述岩体与试验机系统相互作用的关系,假设试验 机系统为理想弹性结构, 刚度为 km, 岩石刚度为 ks, 使 其 km < ka, 建立岩体-试验机系统结构体的轴向压缩 破坏失稳模型,如图1所示。在加载初期,试验机系 统(弹性结构)、岩石被压密;随着轴向应力的增大,弹 性结构体和岩石轴向压缩变形增大,且岩石内原生裂 隙发育扩展,伴随着少量新生裂纹的产生;随着轴向 应力持续加载,岩石原生裂隙、新生裂纹进一步发育 扩展导致试件破坏。在压缩阶段,弹性结构此时积聚 弹性应变能,岩石发生破裂时,会引起弹性结构发生 回弹变形,此时储存在弹性结构体的应变能和岩石自 身弹性能量同时释放在岩石上,进一步加剧岩石的破 裂和破坏,降低了岩石的承载能力。

在该模型中,试件受下部应力 F_1 与上部应力 F_2 的施加,试验机框架受力 F_R ,弹性结构变形 x_m ,试件 变形 x_w ,将试验机框架简化为弹性结构,即试验机框架受力 F_R 与 x_m 成正比,即

$$\begin{cases} F_1 - F_2 = F_R \\ F_R = k_m x_m \end{cases}$$
(1)

引入时间 *t* 时, 岩体荷载 *F*(*t*) 与位移 *u*(*t*) 的函数 表达式为

$$F(t) = f[x_w(t)] \tag{2}$$

假设岩石重量忽略不计,该系统的力学平衡条 件为

$$F_1(t) = F_2(t) + F_R(t)$$
(3)

设 u(t) 为试验机框架与试件的总位移, 即

$$u(t) = x_{\rm m}(t) + x_{\rm w}(t)$$
 (4)

在试验中,随着外部荷载的加载,岩石受力随时间的增加而增大,直至试件发生破坏。若忽略残余强度阶段,则试验机与试件位移随时间 *t*变化,将式(2)—式(3)代入式(4),得

$$\frac{f[x_{\rm m}(t)]}{k_{\rm m}} + x_{\rm w}(t) = u(t)$$
(5)

推导式中的时间 t, 整理得

$$x'_{\rm w}(t) + \frac{f'[x_{\rm w}(t)]}{k_{\rm m}} x'_{\rm w}(t) = u'(t)$$
(6)

$$x'_{\rm w}(t)\left(1+\frac{k_{\rm s}}{k_{\rm m}}\right) = u'(t) \tag{7}$$

式中: k_s - $f'[x_w(t)]$ 为荷载-位移曲线的切线斜率,即岩石刚度。

由式可知,当 k_s > 0, x'_w(t)=u'(t)时,岩样变形速率 小于整体变形速率,在加载过程中岩样处于稳定阶段; 当 k_s=0, x'_w(t)=u'(t)时,岩样变形速率等于整体变形速 率,岩样达到极限强度,即为岩样的峰值点;当 k_s < 0 时,由于试验机系统处于弹性阶段,刚度始终保持一





定值 k_m,此时岩样达到峰值强度后,开始出现稳定破 坏和不稳定破坏两种模式。

研究发现,岩样失稳破坏时,试验机与岩样共同 释放的超过岩样破坏时消耗能量之后的弹性能部 分^[25-26],从能量耗散与释放角度来分析岩样与试验机 系统之间的相互作用模式:①当岩石峰后应力开始, 岩石裂纹扩展导致的耗散能 Wa 大于试验机系统的能 量释放 W₁与岩石自身的能量释放 W_e之和,岩石内部 的损伤和能量耗散过程足以吸收外来以及自身释放 的所有能量,岩石裂纹以缓慢的方式扩展,不会引起 突发的完全断裂;岩体表现为稳定破坏模式;②若岩 石在峰后阶段时,岩石裂纹扩展导致的耗散能 Wa等 于试验机系统的能量释放 W_u与岩石自身的能量释放 W。之和,此时岩体边界上的能量输入和输出达到平衡, 裂纹扩展速率和结构变化处于一种动态的平衡点,稍 有变化可能引发更为严重的破裂,则岩体峰后处于临 界状态模式;③在岩石处于峰后阶段,岩石裂纹扩展 导致的耗散能 W_d小于试验机系统的能量释放 W_a与 岩石自身的能量释放 We 之和,外部与内部的能量释 放没有得到充分的耗散,这导致岩体面临不稳定破裂 的风险。在这种情况下,能量过剩可能导致剧烈的结 构反应,表现为迅速的裂纹扩展,甚至在较短时间内 引发整体的断裂或崩塌。

综上分析可得加载系统刚度下岩石破坏过程中 能量耗散与释放的关系如下:

$$\begin{cases} W_{d} > W_{u} + W_{e} \\ W_{d} = W_{u} + W_{e} \\ W_{d} < W_{u} + W_{e} \end{cases}$$
(8)

2 加载系统刚度下岩石峰后能量演化规律

上述岩石与试验机系统相互作用分析可知,岩石 的破坏程度与试验机系统刚度效应所产生的应变能 释放量有关,但侧向约束力的施加会延缓岩石的破坏 速度,影响其破坏程度^[27-28]。通过能量角度去剖析侧 向约束作用下加载系统刚度的岩石力学特性,探究两 者相互作用下 (侧向约束力与加载系统刚度) 能量释 放对岩石整体破坏特征的影响,更能了解岩体处于围 岩应力环境中的变形破坏本质,防治围岩体发生巨大 变形具有重要意义。

2.1 峰后破坏过程能量耗散规律

根据加载系统刚度原理可知,加载刚度对峰前阶段无明显影响,峰后卸载释放的弹性能和试验机释放的弹性能对岩样的作用相当于串联效应^[29-30]。故假设在 σ₁ 方向应力作用下,岩石试样与试验机框架均要

发生变形,不考虑岩石自重,当岩石破坏时释放的应 变能来自于岩石自身储存的应变能和试验机框架积 聚的应变能,两者叠加瞬间释放并作用在岩石上,会 引发剧烈破坏。

此时试验机系统刚度 (弹性结构体)、岩石自身在 峰前阶段积聚的应变能开始释放,直至应变能释放到 最大限度,进入残余阶段。整个峰后阶段由能量守恒 得^[31]:

$$W_{\rm p} = W_{\rm pe} + W_{\rm pd} \tag{9}$$

式中: W_p为峰后阶段机械能; W_{pe}为峰后阶段对应的 应变能; W_{pd}为峰后阶段对应的耗散能。

进入峰后破坏阶段,与传统岩石应力-应变曲线 不同,在侧向约束作用下,加载系统刚度下岩石应力-应变曲线呈现多次应力升降现象,整体呈台阶式下降, 表现出极大的非稳态释放特征。如图 2 所示, a 点是 失稳点, ab、cd、ef 段表示可释放的能量,为正值, bc、 de 段表示积聚应变能,为负值,由于峰后应力下降阶 段较为剧烈,处于破坏阶段,此时应变变形能释放量 比峰后积聚的应变能较多。即峰后应力跌落过程为: 输入的机械能 Wp、岩石本身和试验机系统储存可释 放应变能 Wpe 中的一部分转化为 Wpd 的过程;峰后应 力上升过程为:输入的机械能和岩石自身、试验机系 统储存应变能的过程。





由以上分析可知,确定峰后应变能释放量是表征 加载系统刚度下岩石破坏程度的关键。当岩体进入 峰后跌落区 *ab*、*cd*、*ef*后,岩体储存的应变能不断地 转化为耗散能,在峰后破坏阶段任意一点 *b* 卸载之后, 岩样将返回形成一条新的曲线 σ_b,应变恢复为 ε_b, 图 2 中 *W*_{pdb} 为点 *b* 处的峰后耗散能, *W*_{peb} 为点 *b* 处的峰后 应变能。

故峰后的输入能要考虑台阶形态,即峰后 a 到 b

向

段的输入能为

$$W_{\rm pb} = \int_{\varepsilon_a}^{\varepsilon_b} \sigma_1 d\varepsilon + \int_{\varepsilon_a'}^{\varepsilon_b'} \sigma_2 d\varepsilon \tag{10}$$

式中: W_{pb} 为峰值到点 b 处压机给予的输入能; ε_b 为 b 点处的应变值。

本次试验保持侧向约束力不变,若峰后阶段弹性 模量为 E_{ii},此时 b 点的应变能为

$$W_{\rm peb} = \frac{\sigma_{\rm b}^2 + \sigma_2^2 - 2\upsilon\sigma_{\rm b}\sigma_2}{2E_{\rm ab}} \tag{11}$$

由式(2)、(3)得峰后 ab 段耗散能为

$$\begin{cases} W_{\text{pdb}} = W_{\text{pb}} - W_{\text{peb}} \\ W_{\text{pdb}} = \int_{\varepsilon_{a}}^{\varepsilon_{b}} \sigma_{1} d\varepsilon + \int_{\varepsilon_{a}'}^{\varepsilon_{b}'} \sigma_{2} d\varepsilon - \frac{\sigma_{1}^{2} + \sigma_{2}^{2} - 2\upsilon\sigma_{1}\sigma_{2}}{2E_{\text{ab}}} \end{cases}$$
(12)

为表征峰后阶段岩石的能量耗散速率,则峰后从 a~b点耗散能增量ΔW_{pd(ab)}为

$$\Delta W_{\rm pd(ab)} = W_{\rm pdb} - W_{\rm pda} \tag{13}$$

为了更好理解岩石在峰后破坏过程中能量转换 机制,以峰后耗散能增量与峰后机械能比值 A_m表明 岩石破坏过程中能量释放程度大小,由式 (10) 和 (13) 可得

$$A_{\rm m} = \frac{\Delta W_{\rm pd(ab)}}{W_{\rm pb}} = \frac{W_{\rm pdb} - W_{\rm pda}}{\int_{\varepsilon_{\rm a}}^{\varepsilon_{\rm b}} \sigma_1 d\varepsilon + \int_{\varepsilon_{\rm a}}^{\varepsilon_{\rm b}'} \sigma_2 d\varepsilon}$$
(14)

2.2 基于加载系统刚度峰后能量非稳态释放规律

从整体上来说,岩石峰后破坏程度及其能量变化 主要有两方面:一是试验机系统作用于岩石的应变能 释放;二是岩石自身积聚的能量释放,这两部分能量 的释放在岩石破坏过程中非常关键,决定了岩石材料 的破坏模式。

1)加载系统刚度下峰后释放能量。加载系统刚 度主要是试验机弹性元件能量储存与释放,根据前文 加载系统刚度原理可知,弹性结构体在峰前只负责积 聚能量,峰后释放能量作用于岩石上,则弹性结构对 岩石的释放能量 W_u为

 $W_{\rm u} = W_{{\rm u}(i)} - W_{{\rm u}(i+1)} (i = 1, 2, 3 \cdots)$ (15)

由式 (15) 可知, 峰后 *a*~*b* 点试验机释放的弹性 能为

$$\begin{cases} W_{u(ab)} = W_{u(a)} - W_{u(b)} \\ W_{u(ab)} = \frac{\sigma_{ua}^2 - \sigma_{ub}^2}{2E_{ab}^u} \end{cases}$$
(16)

2) 侧向约束下岩石峰后释放能量。在侧向约束 作用下,岩石应力应变曲线峰值前岩石不断积聚能量, 接近峰值点时,岩石处于高能量状态,峰值后能量大规模释放,造成岩石突然破坏,出现抛射、弹射等现象。 在峰后破坏阶段,岩石在任意一点可释放的弹性应变 能为 W_e^[31],可得:

$$W_{\rm e} = \frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_{\rm e1} + \mu\sigma_2\varepsilon_{\rm e2} \tag{17}$$

侧向约束作用加载下, 泊松比定义为

$$\varepsilon_{e2} = \mu \varepsilon_{e1} \tag{18}$$

由广义的胡克定律可知:

$$\varepsilon_{\rm e1} = \frac{\sigma_1 - 2\mu\sigma_2}{E_{\rm ij}} \tag{19}$$

将式 (19) 代入式 (17) 得:

$$W_{\rm e(ab)} = \frac{\sigma_1^2 - 4\mu^2 \sigma_2^2}{2E_{\rm ab}}$$
(20)

由式(6)可知,峰后 *a*~*b* 点岩石自身卸载释放的 弹性能为

$$W_{\rm e(ab)} = \frac{\sigma_{\rm a}^2 - \sigma_{\rm b}^2}{2E_{\rm ab}}$$
(21)

此时 b 点岩石自身和试验机释放的弹性能表 示为

$$\begin{cases} W_{\text{peb}} = W_{\text{c(ab)}} + W_{\text{u(ab)}} \\ W_{\text{peb}} = \frac{\sigma_{\text{a}}^2 - \sigma_{\text{b}}^2}{2E_{\text{ab}}} + \frac{\sigma_{\text{ua}}^2 - \sigma_{\text{ub}}^2}{2E_{\text{ab}}^u} \end{cases}$$
(22)

为反映侧向约束作用下加载系统刚度岩石的裂 纹扩展速率和破坏模式,以峰后应变能释放量比 *B*_m 进行表征:

$$B_{\rm m} = \frac{W_{\rm u(ab)} + W_{\rm e(ab)}}{W_{\rm pd} + W_{\rm u(ab)} + W_{\rm e(ab)}}$$
(23)

联合式 (3)、式 (7) 及式 (8), 可得 B_m

$$B_{\rm m} = \frac{\frac{\sigma_{\rm a}^2 - \sigma_{\rm b}^2}{2E_{\rm ab}} + \frac{\sigma_{\rm ua}^2 - \sigma_{\rm ub}^2}{2E_{\rm ab}^u}}{\int_{\varepsilon_{\rm a}}^{\varepsilon_{\rm b}} \sigma_1 d\varepsilon + \int_{\varepsilon_{\rm a}}^{\varepsilon_{\rm b}'} \sigma_2 d\varepsilon + \frac{\sigma_{\rm a}^2 - \sigma_{\rm b}^2}{2E_{\rm ab}} + \frac{\sigma_{\rm ua}^2 - \sigma_{\rm ub}^2}{2E_{\rm ab}^u}}$$
(24)

对于刚性试验机, 在进行力学测试时, 试验机自 身的形变非常小, 几乎无需试验机产生额外的能量供 给岩石, 测试结果主要反映了岩石自身的力学性能, 即 *W*_u 很小 (几乎为 0), 可以忽略不计; 而变刚度试验 机, 其刚度可以改变, 在进行力学测试时, 试验机自身 的形变会变化, 产生一定的额外能量供给岩石, 即 *W*_u 和试验机刚度大小有关, 试验机刚度越小, 所产生的 额外能量 *W*_u 越大, 在岩石峰后破坏时, 从而产生动力 破坏。 综上研究可知,采用式 (14)峰后能量耗散占比 *A_m*在一定程度上衡量加载系统刚度下岩石材料破裂 后的韧性或脆性程度;式 (24)峰后能量释放比 *B_m*大 小反映出加载系统刚度下岩石峰后的断裂敏感性及 破坏的突然性。通过分析侧向约束和加载系统刚度 作用下岩石峰后耗散能占比与能量释放占比,可以充 分考虑侧向约束作用下岩石相对较长的非线性弹性 阶段,峰后台阶跌落等特征,同时在一定程度上可以 综合表达侧向约束和加载系统刚度相互作用下岩石 破坏过程中的能量转换与破坏机制。

3 室内试验分析

3.1 试验设备及方案

本次试验尽可能减小岩样性质的差异给试验带 来的离散性,在同一批次中选择相对均质、波速和密 度相近的砂岩试验,如图 3 所示,按照国际岩石力学 学会 (ISRM)的要求进行切割、打磨至光滑,制作成 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体,并且断面平整度 误差控制在±0.05,垂直度误差控制在±0.25°。试验 前对砂岩试件的基础物理性质参数进行测试,所得结 果见表1。

众多学者研究发现,单轴条件下加载系统刚度对 峰前应力应变曲线、弹性模量等基本无影响,且刚度 越小,岩石峰后行为越表现为脆性,无法得到理想的



峰后曲线^[32-34]。为准确评价加载系统刚度下岩石的 峰后破坏程度以及区分柔性试验与刚性试验的区别, 开展刚性试验机下的双轴压缩试验以及二维可变刚 度试验机下的双轴压缩试验,如图 4 所示。由于试验 机油缸设置问题, σ_1 方向表示轴向加载、 σ_4 方向表示 侧向加载,此时 σ_4 加载方向与前文公式计算的 σ_2 方 向是一样的,为便于区分,下文都采用 σ_4 加载方向进 行说明。



图 3 砂岩试件 Fig.3 Sandstone specimen

表1 砂岩基础物理性质参数

Table 1 Parameters of basic physical properties of sandstone

单轴平均	弹性模量/	密度/	平行层理	垂直层理
抗压强度/MPa	GPa	$(g \cdot cm^{-3})$	波速/(m・s ⁻¹)	波速/(m・s ⁻¹)
48	9.66	2.467	2 612	1 856



Fig.4 Loading diagram

图 4 加载示意

刚性试验机下的双轴压缩试验的目的是为了获 得精确的岩石在不同侧向约束下的全应力--应变曲线, 该试验在安徽理工大学自主研发的 TAWZ-5000/3000 微机控制岩石真三轴 (扰动) 试验系统上进行, 如图 5a 所示, 该系统垂直方向最大试验力高达 5 000 kN, 系 统刚度高 (10 GN/m), 测力精度在±1% 以内。开展不 同侧压约束作用下力学试验, 将 σ_1 、 σ_4 方向同时分别 以加载速率 500 N/s 加载至 25、50、75 kN, 然后沿 σ_1 方向以变形加载速率 0.1 mm/min 加载直至破坏。

二维可变刚度试验机下的双轴压缩试验的目的

是得到在侧向约束作用下加载系统刚度的峰后破坏 曲线,该试验在安徽理工大学自主研发的 ZS-B 二维 可变刚度动力破坏模拟试验系统上进行,如图 5b 所 示,该系统加载刚度调节范围 0.3~6 GN/m,加载速度 为 0.05~10 mm/min,最大轴向力 1 000 kN,最大水平 力 600 kN,测力精度在±1% 以内。开展不同侧向约束 作用下不同加载系统刚度下力学试验,将 σ₁、σ₄ 方向 同时分别以加载速率 500 N/s 加载至 25、50、75 kN, 加载刚度分别设置为 0.3、0.8、1.5 GN/m,然后沿 σ₁ 方向以变形加载速率 0.1 mm/min 加载直至破坏。为





(b) 二维可变刚度动力破坏模拟试验系统(变刚度试验机)

图 5 试验设备

Fig.5 Test equipment

保证试验结果的准确性,相同方案分别进行3次重复 测试。

3.2 试验结果分析

为准确评价加载系统刚度下岩石的破坏程度以 及区分变刚度试验与刚性试验的区别,采用安徽理工 大学自主研发的二维可变刚度动力破坏模拟试验系 统分别开展不同刚度(刚性试验、0.3、0.8、1.5 GN/m)、 不同侧压约束下 (25、50、75 kN) 的岩石力学行为试 验,获得其峰后应力应变曲线,如图 6-图 7 所示。 ① 在单轴加载条件下进行加载系统刚度试验时,砂岩 试样表现出显著的脆性破坏特征。随着加载系统刚 度的降低,峰后阶段的轴向应力迅速、几乎呈垂直式 跌落至零,反映出典型的脆性失稳特征,而轴向应变 仅有轻微增加。表明低刚度加载条件下,试样内部裂 纹扩展迅速,能量瞬间释放,导致失稳破坏。②在侧 向约束作用下加载系统刚度试验过程中岩样峰后应 力-应变曲线出现了明显的应力跌落起伏,呈现较长 的应力降过程,即 ab 段的骤降骤升,表现出波动性破 坏特征,应力下降后,试样再次进入稳态加载,应力缓 慢上升,能量逐渐积聚。这一现象表明岩体破坏过程 中的能量释放具有阶段性特征,可能与侧向约束力的

施加有关,限制了横向变形,导致岩样峰后非连续变 形破坏。③ bc 段进入完全破坏阶段,岩样应力出现 急剧下降或垂直跌落,并伴有明显的声响,这一阶段 说明岩样经历了剧烈的动能释放和大规模的结构失 效。④ 刚性试验岩样峰后应力-应变曲线与变刚度试 验曲线有明显的差别,刚性试验机试验岩样峰后轴向 应力随应变增加而缓慢下降,试件发生多次破裂,曲 线呈现出台阶状特征,并且存在残余阶段,如图 6d 所 示。表明侧向约束力对岩样变形有明显的抑制作用 和塑性变形的增强作用,加载系统刚度影响峰后变化, 会产生明显的回弹变形特征,尤其在侧压的作用下, 回弹效应更为显著。





3.3 岩石破坏过程中的能量变化规律

3.3.1 试验机系统 (加载刚度)能量变化

由式 (2) 可知,作出关于峰后试验机系统对岩石 的释放能量 W_u曲线图,由于刚性试验加载下,试验机 做功很少,即可忽略不计,重点研究加载系统刚度下 峰后试验机系统能量演化规律。如图 8 所示,当 W_u > 0 时,说明试验机系统开始释放出能量作用于岩石上, 当 W_u < 0 时,由于岩样处于加载状态,应力上升,导致 试验机系统开始积聚能量。从整体上来说,峰后试验 机系统释放的应变能多于积聚的应变能,且在峰后应 力完全下降时,释放出大量的能量,导致岩样失稳破 坏;结果表明,加载系统刚度越低,试验机系统对岩石 释放的能量越多,受侧向约束力的原因,峰后试验机 系统能量释放呈阶梯状。

由图 9 分析可知: 在加载刚度为 0.3 GN/m 时, 不同约束条件下试验机系统释放能量分别为 0.016、0.021、0.052 J/m³, 侧向约束力 75 kN 的释放能量相比 25 kN 时增大了 69.23%; 在侧向约束力为 25 kN时, 不同加载系统刚度下试验机系统释放能量分别为 0.016、0.015、0.004 J/m³, 加载刚度 0.3 GN/m 的释放能量相比 1.5 GN/m 增大了 75%; 采用非线性拟合曲

报

煤





Fig.8 Change of energy of testing machine system under loading system stiffness

线,发现不同加载系统刚度与试验机系统能量释放曲 线拟合关系良好(拟合系数 R²均在 0.95 以上),加载 系统刚度与试验机框架能量释放之间存在显著相关。 研究结果表明,随着加载系统刚度的增大,试验机框 架所释放的能量越少;在等刚度加载下,随着侧向约 束力的增大,试验机系统所释放能量越多,改变了岩 石破裂时的能量释放模式,说明侧向约束力限制了岩 样的水平变形,岩样的强度增加,在加载系统刚度的 加持下,试验机框架的变形增大,导致试验机框架所 储存的应变能也就越多,最终岩样破坏时会释放较多 的能量。







3.3.2 加载系统刚度下岩样破坏过程中能量转化 规律

基于加载系统刚度下岩石破坏过程中能量耗散 与释放的关系,根据式(5)和式(12)计算得到不同加 载条件下岩样峰后过程中的能量增量情况,双轴压缩 加载系统刚度下岩样峰后应力-应变-能量增量关系 曲线如图 10所示。在变刚度试验加载过程,当ΔW_{pe}> 0时,峰后应变能释放,ΔW_{pe}<0时,峰后应变能积聚, 根据峰后能量释放与耗散关系,将峰后能量关系分别 划分释放、耗散、稳定3个阶段;在峰后释放阶段(前 期),此时砂岩试样处于峰后应力下降初期,由于侧向 约束的作用,岩样的横向膨胀受到限制,在一定程度 上促进了裂隙在加载σ₁方向的扩展。在岩样达到峰 值应力后,大量裂隙迅速形成并扩展,导致能量以裂 隙形成、扩展以及试验机系统额外能量来释放。 $\Delta W_{\rm pe}$ 急剧增加,即 $\Delta W_{\rm pe} > \Delta W_{\rm pd}$,表现为显著的能量释 放。在峰后耗散阶段(中期),随着裂隙扩展的难度增 加,能量释放的速度开始减缓,耗散过程逐渐占据主 导地位。此时,释放的应变能量小于耗散能量,即 $\Delta W_{\rm pe} < \Delta W_{\rm pd}$,这一过程涉及较慢且连续的能量转换, 导致能量耗散量增加,说明侧向约束进一步限制了裂 隙的横向扩展,使得能量更多以耗散形式存在。在峰 后稳定阶段(后期),岩样已经发生了完全的结构性破 坏,能量耗散和释放均接近停止,不再有显著的能量 变化,表现为释放的应变能量与耗散能量接近相等, 即∆W_{ne}≈∆W_{nd}。在刚性试验机加载下,峰后能量变化 表现为2个主要阶段,即释放阶段和稳定阶段。在峰 后中后期,由于岩样的脆性破坏特征, $\Delta W_{\rm pe}$ 和 $\Delta W_{\rm pd}$ 几 乎相等,岩样的破坏过程趋于稳定,不再产生新的能 量积聚。

研究表明侧向约束作用可以增强刚度加载效应, 峰后回弹效应较为明显,能量呈现上下起伏特征,不 断释放与积聚,最终耗散能近似释放能,能量完全作 用于岩样,表现为大规模的结构性失效。

为进一步分析侧向约束作用下加载系统刚度对 岩石能量演化规律的影响,以岩石峰后最大应变能释 放量与最大耗散能描述不同加载条件下岩样破坏过 程与能量变化之间的关系,如图 11a 所知,随着加载 系统刚度的增大,岩样的最大应变能释放量呈非线性





图 10 不同加载条件岩样峰后应力应变--能量关系曲线





Fig.11 Post-peak energy change curves of rock samples under different loading conditions

形式减少; 在 σ_4 =25 kN 的作用下, 当 k_m = 0.3 GN/m 时, 最大应变能释放量为 k_m = 1.5 GN/m 时的 1.5 倍, 与刚 性加载试验相比增加了 0.058 J/m³, 增幅为 41.27%; 随 着侧向约束力的增加, 岩样的应变能释放量也随之增 加; 在 k_m = 0.3 GN/m 的作用下, 当 σ_4 = 75 kN 时, 相 比 σ_4 = 25 kN 增加了 0.036 J/m³, 增幅为 20.63%。

如图 11b 所示,随着侧向约束力的增加,岩样的 最大耗散能呈非线性形式增加,在 $k_m = 0.3$ GN/m的 作用下,当 $\sigma_4 = 75$ kN时,相比 $\sigma_4 = 25$ kN增加了 0.28 J/m³,增幅为41.02%;随着加载系统刚度的增加, 岩样的最大耗散能随之减少,在 $\sigma_4 = 25$ kN的作用下, 当 $k_m=0.3$ GN/m时,最大耗散能与刚性加载试验相比 增加了 0.33 J/m³,增幅为 82.72%。随着侧向约束力的 增加,加载系统刚度下岩样最大耗散能的增幅相对较 大,说明侧向约束作用增强了刚度效应,提高了岩样 破裂或破坏时的能量耗散和释放,侧压下岩样吸收的 能量主要用于岩石内部塑性变形的消耗。

3.4 加载系统刚度下岩样能量分配规律

由上述式 (14) 和式 (24) 推导出的加载系统刚度 下岩样峰后耗散能占比 A_m 与能量释放占比 B_m 表征 岩样的损伤和破坏程度, 以侧向约束 $\sigma_4 = 25$ kN 为例, 不同加载刚度条件下岩样峰后能量占比-应变关系曲 线如图 12 所示, 峰后耗散能占比 A_m 随着应变的增大 而先增大后趋于稳定,而能量释放占比 $B_{\rm m}$ 随着应变的增大而先减小后趋于稳定的趋势,符合非线性拟合曲线,发现 $A_{\rm m}$ 、 $B_{\rm m}$ 与 ε 曲线拟合关系良好 (拟合系数 R^2 均在 0.95 以上),且 $A_{\rm m}$ 、 $B_{\rm m}$ 与 ε 之间存在显著相关。





由前面 4.3.2 节中能量转化规律分析可知, 在峰 后阶段前期 ($\Delta W_{\rm pe} > \Delta W_{\rm pd}$), 在加载系统刚度的作用下, 试验机系统经过多次回弹来逐步释放,导致弹性能释 放占比较大,随着加载刚度的降低,最大弹性能释放 占比随之增加, Bm 依次是 0.45、0.61、0.67、0.76; 在峰 后阶段中期 ($\Delta W_{\rm pe} < \Delta W_{\rm pd}$), 在侧向约束与加载系统刚 度的共同作用下,随着应力的持续加载,更多的能量 需要克服岩石内部的凝聚力和摩擦力,表现出耗散能 占比高于弹性能释放占比,随着加载刚度的降低,最 大耗散能占比随之增加, Am 依次是 0.89、0.94、0.95、 0.96; 在峰后阶段后期 (ΔW_{pe}≈ΔW_{pd}), 岩石内部裂纹已 经完全贯通,不再形成新的破裂面,此时弹性能释放 占比 Bm 与耗散能占比 Am 趋于稳定状态,这与上述能 量转化分析相互印证。研究表明,侧向约束的施加增 强了刚度效应,使得岩样在峰后前期能量释放较为迅 速,峰后中期能量主要通过耗散机制消耗,峰后后期

能量释放和结构变化进入一种稳定阶段。

4 讨 论

笔者基于能量转化规律研究发现,侧向约束力与 加载系统刚度的共同作用显著影响岩体的破坏模式 与能量转化过程,在低刚度加载条件下,岩体会获得 的额外能量补给,能量的分布聚集可能会引发岩爆、 大变形等动力破坏现象。

在矿山开采工程中,巷道围岩的变形破坏实质上 是外部能量输入与围岩体内部能量转化的结果。根 据热力学第一定律,能量不会无故产生或消失,只会 在转化为不同形式^[35-36],而能量转化过程受围岩与破 坏岩体之间相对刚度大小的影响。通过上述研究表 明,加载刚度越小,外部能量补给越多,围岩破坏时释 放能量也就越多,易发生失稳现象。结合工程实际, 加载系统刚度在岩石破坏过程中的能量释放与耗散 关系中起关键作用,施加适当约束力可以显著改变岩 石破裂时的能量释放模式,提高能量耗散机制则能有 效降低岩体储存的弹性能量。故可采取相应措施(如 施加侧向约束力、提高能量耗散机制与释放应力)来 提高巷道围岩的稳定性。

 1)施加侧向约束力。施加一定的侧向约束力可 以显著改变岩石破裂时的能量释放模式,在实际应用 中,支护结构可以改变巷道围岩耗散能分布特征,降 低整体能量耗散。如采用全长锚固方式来提高支护 结构体整体刚度及抗剪能力;通过表面喷水改善围岩 性质,降低岩体强度,增加塑性,从而减少能量的突然 释放。

2) 分阶段能量控制。根据峰后不同阶段的能量 演化特点,采取分阶段控制措施,在峰后前期(能量快 速释放阶段),应避免对岩体施加过大的扰动,防止能 量的过度释放;在峰后中期(能量耗散阶段),可采取高 吸能材料进一步消耗岩体内部的剩余能量,降低动力 灾害风险。

3) 降低岩体储能能力。为释放因低刚度影响而 积聚在巷道围岩中的弹性应变能,应采取措施提高围 岩内部的应变能耗散,结合工程实际可以通过采取钻 孔、切缝、爆破等卸压手段来实现,从而提高巷道围岩 的整体稳定性。

5 结 论

1) 建立岩体-试验机系统结构体的轴向压缩破坏 失稳模型,分析了结构体各部分的变形、刚度、能量等 演化规律,指出了加载系统刚度下岩石破坏过程中能 量耗散与释放的关系,分别是稳定破坏(W_d > W_u+W_e)、 2)对比刚性和变刚度试验机系统下的双轴压缩 试验,发现加载系统刚度对岩样峰后应力应变曲线具 有显著影响。变刚度系统下,岩样表现出局部非稳态 破坏特征;而刚性系统下,峰后应力随应变增加呈缓 慢下降,多次破裂并呈现出台阶状曲线。

3)加载系统刚度和侧向约束力显著影响岩石破 坏过程中的能量演化。随着加载系统刚度增大,最大 应变能释放量和最大耗散能均呈非线性减少;随着侧 向约束力的增加,最大应变能释放和最大耗散能则呈 非线性增加。

4) 侧向约束的施加增强了刚度效应,改变了岩石 破裂时的能量释放模式,岩样在峰后前期 ($\Delta W_{\rm pe} > \Delta W_{\rm pd}$) 能量释放迅速,峰后中期 ($\Delta W_{\rm pe} < \Delta W_{\rm pd}$) 能量主 要通过耗散机制消耗,峰后后期 ($\Delta W_{\rm pe} \approx \Delta W_{\rm pd}$) 能量释 放和结构变化逐渐稳定。

5) 低刚度加载会导致岩体额外能量补给,增加岩 爆和大变形等动力灾害的风险,通过施加侧向约束力、 分阶段能量控制及降低岩体储能能力等措施,可以有 效改变能量释放模式,增强能量耗散,从而提高巷道 围岩的稳定性。

参考文献(References):

- 谢和平,彭瑞东,鞠杨,等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学 与工程学报, 2005, 24(15): 2603-2608.
 XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2603-2608.
 REA, 浙和平, 在古法,其工作是理论的出工社在时时,期回日,
- [2] 周昌台,谢和平,朱建波. 基于能量理论的岩石动态破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1890-1898.
 ZHOU Changtai, XIE Heping, ZHU Jianbo. A dynamic strength criterion of rock materials based on energy theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 1890-1898.
- [3] 张佳. 岩石压缩能量演化规律及非线性演化模型研究[J]. 煤炭科 学技术, 2021, 49(8): 73-80.
 ZHANG Jia. Study on evolution law of rock compression energy and nonlinear evolution model[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 73-80.
- [4] 万荣基,肖亚勋,丰光亮,等. 岩爆刚度理论研究进展与趋势展望
 [J/OL]. 金属矿山, 1-18[2024-05-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20230322.1718.006.html.
 WAN Rongji, XIAO Yaxun, FENG Guangguang, et al. Research progress and trend prospect of rock burst stiffness theory [J/OL]. Metal

Mine, 1–18[2024–05–10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055. TD.20230322.1718.006.html.

[5] 张志镇,高峰.3种岩石能量演化特征的试验研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(3):416-422.

ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Experimental investigations on en-

ergy evolution characteristics of coal, sandstone and granite during loading process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(3): 416–422.

- [6] 杨小彬,程虹铭,裴艳宇.不同加载方式下岩石变形及峰后能量演 化特征研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3229-3236. YANG Xiaobin, CHENG Hongming, PEI Yanyu. Study on characteristics of rock deformation and post-peak energy evolution under different loading modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3229-3236.
- [7] ZHANG H J, LI C C. Effects of confining stress on the post-peak behaviour and fracture angle of fauske marble and iddefjord granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(5): 1377–1385.
- [8] TIWARI R P, RAO K S. Post failure behaviour of a rock mass under the influence of triaxial and true triaxial confinement[J]. Engineering Geology, 2006, 84(3-4): 112–129.
- [9] 夏英杰,李连崇,唐春安,等.基于峰后应力跌落速率及能量比的岩体脆性特征评价方法[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(6):1141-1154.
 XIA Yingjie, LI Lianchong, TANG Chun ¢ an, et al. Rock brittle-

ness evaluation based on stress dropping rate after peak stress and energy ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(6): 1141–1154.

- [10] 张超,杨期君,曹文贵.考虑峰值后区应力跌落速率的脆岩损伤本 构模型研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3099-3106. ZHANG Chao, YANG Qijun, CAO Wengui. Study of damage constitutive model of brittle rock considering post-peak stress dropping rate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3099-3106.
- [11] 陈光波,李谭,张国华,等.基于剩余能量释放速率指数的煤岩组 合体冲击倾向性判定[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1366-1383.

CHEN Guangbo, LI Tan, ZHANG Guohua, et al. Determination of impact tendency of coal-rock composite based on residual energy release rate index[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(6): 1366–1383.

- [12] GONG F Q, WANG Y L, WANG Z G, et al. A new criterion of coal burst proneness based on the residual elastic energy index[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(4): 553–563.
- [13] 宋洪强, 左建平, 陈岩, 等. 基于岩石破坏全过程能量特征改进的 能量跌落系数[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 91-98.
 SONG Hongqiang, ZUO Jianping, CHEN Yan, et al. Revised energy drop coefficient based on energy characteristics in whole process of rock failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 91-98.
- [14] 张军, 艾池, 李玉伟, 等. 基于岩石破坏全过程能量演化的脆性评价指数[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1326-1340.
 ZHANG Jun, AI Chi, LI Yuwei, et al. Brittleness evaluation index based on energy variation in the whole process of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1326-1340.
- [15] 陈国庆,吴家尘,蒋万增,等. 基于弹性能演化全过程的岩石脆性 评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 901-911.
 CHEN Guoqing, WU Jiachen, JIANG Wanzeng, et al. An evaluation method of rock brittleness based on the whole process of elastic energy evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and En-

gineering, 2020, 39(5): 901-911.

- [16] 赵毅鑫, 王小良, 郭延定, 等. 基于能量释放率的不同赋存深度砂 岩脆性指数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 248-262. ZHAO Yixin, WANG Xiaoliang, GUO Yanding, et al. Brittleness index of sandstones from different buried depths based on energy release rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 248-262.
- [17] 宋昊,夏敏,任光明.基于峰前能量演化及峰后侧向变形特征的岩石脆性评价方法[J].成都理工大学学报(自然科学版),2023, 50(6):723-733.

SONG Hao, XIA Min, REN Guangming. Rock brittleness evaluation method based on pre-peak energy evolution and post-peak lateral deformation characteristics[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2023, 50(6): 723–733.

- [18] 顾金才,范俊奇,孔福利,等.抛掷型岩爆机制与模拟试验技术[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(6):1081-1089.
 GU Jincai, FAN Junqi, KONG Fuli, et al. Mechanism of ejective rockburst and model testing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1081-1089.
- [19] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型
 [J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 1-6.
 QIAN Qihu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 1-6.
- [20] TARASOV B G, STACEY T R. Features of the energy balance and fragmentation mechanisms at spontaneous failure of class I and class II rocks[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2017, 50: 2563–2584.
- [21] XU Y H, CAI M. Influence of strain energy released from a test machine on rock failure process[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(6): 777–791.
- [22] BLAKE W. Rock-Burst Mechanics[M]. Colorado: Quarterly of Colorado School of Mines, 1972, 65(1): 1–64.
- [23] 赵同彬, 尹延春, 谭云亮, 等. 变刚度加载试验系统的研制及其在 煤岩破坏力学行为测试中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1846-1857.

ZHAO Tongbin, YIN Yanchun, TAN Yunliang, et al. Development of a rock testing system with changeable stiffness and its application in the study on the rock failure mechanical behavior[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1846–1857.

[24] 尹延春,赵同彬,李海涛,等.不同加载刚度下煤体冲击倾向性测 试及评价指数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12): 2982-2992.

YIN Yanchun, ZHAO Tongbin, LI Haitao, et al. Bursting liability test and evaluation index analysis of coal under different loading stiffnesses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(12): 2982–2992.

- [25] QIN S Q, JIAO J J, TANG C A, et al. Instability leading to coal bumps and nonlinear evolutionary mechanisms for a coal-pillar-androof system[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(25-26): 7407–7423.
- [26] ZHANG D X, GUO W Y, ZANG C W, et al. A new burst evaluation index of coal-rock combination specimen considering re-

bound and damage effects of rock[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 984–999.

- [27] 赵光明, 刘之喜, 孟祥瑞, 等. 真三轴循环主应力作用下砂岩能量 演化规律[J]. 岩土力学, 2023, 44(7): 1875–1890.
 ZHAO Guangming, LIU Zhixi, MENG Xiangrui, et al. Energy evolution of sandstone under true triaxial cyclic principal stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(7): 1875–1890.
- [28] 赵光明,刘之喜,孟祥瑞,等. 高径比对砂岩能量积聚与耗散试验 及分析方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1110-1121. ZHAO Guangming, LIU Zhixi, MENG Xiangrui, et al. Energy accumulation and dissipation test and analysis method of height-diameter ratio sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1110-1121.
- [29] 孟庆彬, 王从凯, 黄炳香, 等. 三轴循环加卸载条件下岩石能量演 化及分配规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2047–2059. MENG Qingbin, WANG Congkai, HUANG Bingxiang, et al. Rock energy evolution and distribution law under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2047–2059.
- [30] 李泓颖, 刘晓辉, 郑钰, 等. 深埋锦屏大理岩渐进破坏过程中的特征能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3229–3239. LI Hongying, LIU Xiaohui, ZHENG Yu, et al. Characteristic Energy Analysis of Progressive Failure Process of Deep-Buried Jinping Marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3229–3239.
- [31] 左建平,黄亚明,熊国军,等. 脆性岩石破坏的能量跌落系数研究
 [J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 321-327.
 ZUO Jianping, HUANG Yaming, XIONG Guojun, et al. Study of energy-drop coefficient of brittle rock failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 321-327.
- [32] 刘景儒, 张永双, 吴树仁, 等. 滇藏铁路丽江玉峰寺隧道围岩岩爆 刚度判据[J]. 地质通报, 2007, 26(6): 748-755. LIU Jingru, ZHANG Yongshuang, WU Shuren, et al. Rigidity criterion for rockburst in the yufengsi tunnel in Lijiang City of the Yunnan-Tibet railway, China[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(6): 748-755.
- [33] HE M C, REN F Q, CHENG C. Experimental and numerical analyses on the effect of stiffness on bedded sandstone strain burst with varying dip angle[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(5): 3593–3610.
- [34] YIN Y C, ZHENG W W, TANG X X, et al. Test study on failure and energy supply characteristics of rock under different loading stiffness[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106796.
- [35] 张俊文,邓雪杰,郑通达. 充填开采防治坚硬顶板型冲击地压综述研究[J]. 绿色矿山, 2024(2): 103-121. ZHANG Junwen, DENG Xuejie, ZHENG Tongda. A review on hard roof rock burst prevention and control by backfill technology[J]. Journal of Green Mine, 2024(2): 103-121.
- [36] 刘学生, 王新, 谭云亮, 等. 深部沿空巷道锚固围岩破坏失稳能量 驱动机理[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1819–1833.
 LIU Xuesheng, WANG Xin, TAN Yunliang, et al. Energy-driven mechanism of failure and instability of anchored surrounding rock in deep gob-side entry[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1819–1833.