动态扰动损伤状态对砂岩特征应力及声发射响应特征的影响*

赵钺[1]，肖彤[1]，赵红超[2]，王立[1]

（1.兰州有色冶金设计研究院有限公司， 甘肃 兰州 730099；
2.新疆大学 地质与矿业工程学院， 新疆 乌鲁木齐 830046）

摘要：矿产开采过程中岩体往往承受着不同程度的动态载荷，通过一系列动态冲击试验与单轴压缩试验，对冲击作用后砂岩的特征应力和声发射特征参数进行了分析，研究了动态扰动损伤对砂岩试件力学行为及声发射响应特征的影响。结果表明：随着冲击速度的增大，冲击试验后的砂岩试件纵波波速呈逐渐下降的变化趋势，而其内部损伤变量呈现逐渐增大的变化趋势；随着冲击速度的增大，砂岩试件裂纹闭合应力与峰值应力的比值在逐渐增大，起裂应力与峰值应力的比值以及损伤应力与峰值应力的比值均在逐渐减小；在岩石变形破坏过程中，声发射活动表现出显著的阶段性演化特征，其活动强度及其频率特性随岩石内部的损伤演化会发生显著的阶段性变化。研究结果可以为爆破扰动下巷道围岩稳定性评价与支护设计提供理论依据。

关键词：动态扰动；冲击损伤；砂岩；特征应力；声发射

中图分类号：TD313　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)06-0164-09

The Influence of Dynamic Disturbance-Induced Damage on the Characteristic Stress and Acoustic Emission Response Characteristics of Sandstone

ZHAO Yue[1], *XIAO Tong*[1], *ZHAO Hongchao*[2], *WANG Li*[1]

(1.Lanzhou Nonferrous Metallurgical Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730099, China;
2.School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: In the process of mineral exploitation, rock mass often bears different degrees of dynamic load. A series of dynamic impact and uniaxial compression tests were conducted to analyze the characteristic stress and acoustic emission characteristic parameters of sandstone after impact. The influence of dynamic disturbance damage on the mechanical behavior and acoustic emission response characteristics of sandstone specimens was studied. The results show that with the increase of impact velocity, the longitudinal wave velocity of sandstone specimens after impact test decreases gradually, while the internal damage variable increases gradually. With the increase of impact velocity, the ratio of crack closure stress to peak stress of sandstone specimens increases gradually, while the ratio of crack initiation stress to peak stress and the ratio of damage stress to peak stress decrease gradually. In the process of rock deformation and failure, acoustic emission activity shows significant stage evolution characteristics, and its activity intensity and frequency characteristics will change significantly with the damage evolution inside the rock. The research results can provide theoretical basis for the stability evaluation and support design of roadway surrounding rock under blasting disturbance.

Key words: Dynamic disturbance, Impact damage, Sandstone, Characteristic stress, Acoustic emission

0 引言

在地下工程建设、采场巷道掘进及露天矿山开采等动力扰动环境下，岩石材料往往承受复杂的动态载荷作用[1-3]。这种动态扰动不仅改变了岩石内部的损伤分布和演化规律，还显著影响了岩石的力学性能和破坏模式，进而对工程结构的稳定性和安全性产生重要影响[4-5]。随着工程规模的不断扩大和井下环境越来越复杂，研究动态扰动作用对岩石特征应力与损伤特性的影响已经成为岩石力学与工程学领域的前沿热点问题。

动态扰动通过应力波的传播在岩石内部引发应力集中和微裂纹扩展，从而对岩石的微观结构和宏观力学性能产生显著影响[6-7]。相关研究表明，动态

* **收稿日期**：2024-12-09
基金项目：国家自然科学基金项目(52164011)
作者简介：赵钺(1989—)，男，甘肃徽县人，高级工程师，研究方向为金属矿山开采。E-mail:272666935@qq.com

扰动作用会诱导岩石内部的初始裂纹闭合、扩展及新裂纹的产生,从而引起损伤累积及岩石强度和变形特性的改变。例如,张人凡等[8]、张亚宾等[9]研究发现,动态冲击速度越大,岩石内部的微观损伤越严重,波速和强度等关键力学参数均表现出明显的劣化趋势。尽管如此,动态扰动对岩石损伤演化的机理研究仍存在较大的挑战,特别是定量描述扰动强度、损伤状态与岩石力学行为之间的关系方面。

岩石在受载过程中经历了一系列典型的力学阶段,包括裂纹闭合、裂纹扩展和宏观破坏等[10]。在这些阶段中,各种特征应力参数(如裂纹闭合应力 σ_{cc}、起裂应力 σ_{ci}、损伤应力 σ_{cd} 与峰值应力 σ_f 等)可以较好地反映岩石的变形破坏特征及内部损伤演化过程,特征应力的确定对评估岩石材料的稳定性和可靠性具有重要的工程意义[10]。例如,起裂应力通常被认为是岩石内部裂纹扩展的起始标志,其大小直接影响岩石的承载能力和破坏模式[11-13]。然而,当前对动态扰动作用下岩石特征应力的研究仍有不足,尤其是在不同扰动强度下特征应力的变化规律及其物理机制方面,尚需进一步探讨。

声发射(AE)技术作为一种非接触式、实时监测岩石损伤与破裂演化的有效工具,在岩石力学研究中得到了广泛应用[14]。AE 信号可以反映岩石内部微裂纹的萌生、扩展及贯通过程,其活动强度、频率特性及时空分布规律为研究岩石损伤机制提供了重要依据。近年来,AE 技术被广泛应用于动态扰动条件下的岩石损伤研究,揭示了扰动引起的微裂纹扩展模式及其与力学行为的耦合关系[15-16]。然而,AE 信号的复杂性和随机性使得其在动态载荷条件下的应用仍然面临诸多挑战。

鉴于上述问题,本研究结合动态冲击试验和单轴压缩试验,系统研究了动态扰动损伤状态对砂岩试件特征应力及声发射响应特征的影响。通过分析不同冲击速度下砂岩试件的损伤累积规律、力学行为及 AE 特征,揭示其在动态扰动条件下的损伤演化机制及变形破坏特性。本研究不仅深化了对动态扰动条件下岩石力学行为的理解,还可为爆破扰动环境中巷道围岩的稳定性评价与支护设计提供理论依据和技术支持。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

为研究爆破扰动下巷道围岩的力学响应特征,本试验选取广西某矿山围岩中常见的砂岩作为研究对象。所选砂岩岩块埋深较大,质地均匀,风化程度相对较低,且表面无肉眼可见裂纹。为尽可能降低砂岩试件物理性质和试验数据的离散性,所有试件均取自同一块砂岩岩体。根据国际岩石力学协会(ISRM)室内试验标准,通过切割和抛光制备直径为 50 mm、高径比为 2∶1 的标准圆柱体试件。为减弱试验中试件端部效应,将试件端面平行度控制在±0.02 mm 范围内,并确保端面与试件轴线垂直。

1.2 试验方案

在进行相关力学测试之前,需对制备完成的岩石试件使用游标卡尺测量其直径和高度,并对试件进行称重,同时利用波速仪测定试件的纵波波速。为减少岩石材料非均质性对试验数据离散性的影响,选择质量和 P 波波速较为接近的试件用于后续试验。砂岩试件的编号及其物理参数见表 1。

表 1 砂岩试件的编号与物理参数

Table 1 The serial numbers and physical parameters of sandstone specimens

编号	冲击速度/(m/s)	高/mm	直径/mm	质量/g	波速/(m/s)	孔隙率/%
H-0-1	0	99.87	49.92	506.22	2 941	6.28
H-0-2	0	99.95	49.92	504.35	2 956	6.34
H-0-3	0	99.84	49.92	501.39	2 981	6.41
H-5-1	5	99.96	49.92	503.98	2 976	6.23
H-5-2	5	99.97	49.92	501.68	2 996	6.37
H-5-3	5	99.83	49.92	502.67	2 932	6.32
H-6-1	6	99.81	49.92	502.34	2 952	6.43
H-6-2	6	99.94	49.92	504.82	2 975	6.63
H-6-3	6	99.92	49.92	506.31	2 975	6.63
H-7-1	7	99.98	49.92	504.18	2 950	6.68
H-7-2	7	99.94	49.92	503.26	2 961	6.53
H-7-3	7	99.84	49.92	502.19	2 923	6.13
H-8-1	8	99.84	49.92	505.30	2 935	6.03
H-8-2	8	99.86	49.92	504.16	2 986	6.65
H-8-3	8	99.87	49.92	502.25	2 992	6.72

为了分析爆破振动对巷道围岩损伤的影响,本研究采用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置对砂岩试件进行动态力学加载试验。该试验装置主要包含撞击杆、入射杆、透射杆、吸收杆、动态信号放大器以及示波器等部件。上述所有的杆件均使用硅锰钢材料进行制备,材料性能包括纵波速度 5 201 m/s、密度 7 800 kg/m^3 和杨氏模量 211 GPa。撞击杆、入射杆和透射杆的长度分别为 100 mm、3 000 mm 和 1 800 mm,所有杆件的直径均为 38 mm[3]。

试验过程中,通过高压气体驱动撞击杆,与入射杆接触后会产生入射波。当入射波到达入射杆和砂岩试件的交界面时,由于两种介质波阻抗的差异,在

入射杆中产生反射波,同时在透射杆中形成透射波。应变片分别布置在入射杆和透射杆上,用于采集波形信号,这些信号经动态信号放大器处理后在示波器上进行显示[3]。

本试验选择冲击速度为 5 m/s、6 m/s、7 m/s 和 8 m/s 进行冲击载荷损伤试验,分析不同冲击速度下砂岩试件的损伤程度及表面裂隙分布情况。随后,利用波速仪测量循环冲击试验后砂岩试件的纵波波速,以评估其损伤状态。

单轴压缩试验采用 RMT-150C 精密电子伺服压力机进行加载,加载方式为位移控制,加载速率设置为0.002 mm/s,直至岩石试件发生失稳破坏。试验过程中,实时记录试件的应力、应变等关键数据。为降低试件端部摩擦效应,岩石试件两端面均匀涂覆一层凡士林。此外,在声发射接收传感器与砂岩试件接触部位涂抹一层凡士林,以确保传感器与试件表面良好耦合。为了避免试验环境噪声对试验结果的干扰,声发射采集系统的门槛阈值设置为 35 dB,前置增益设置为 40 dB,采样频率设置为每秒采集一百万个点。

2 试验结果分析

2.1 动态扰动作用下砂岩试件物理性质的演化规律

为了探究冲击载荷作用对砂岩试件物理参数与力学性质的影响,本文对不同冲击速度条件下砂岩试件动态应力-动态压缩应变进行了统计分析。限于篇幅原因,本文仅展示了 H-5-1、H-6-1、H-7-1 与 H-8-1 砂岩试件的动态应力-动态压缩应变曲线,如图 1 所示。

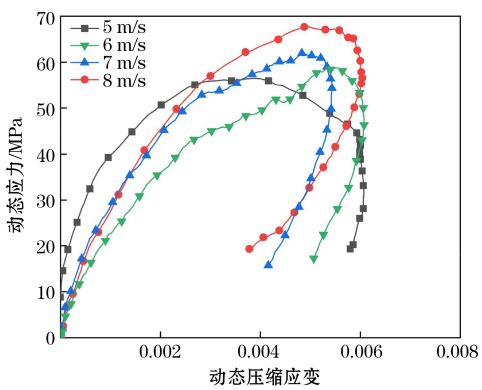


图 1 不同冲击速度条件下砂岩试件的动态应力-动态压缩应变曲线

Fig.1 Dynamic stress-dynamic compressive strain curves of sandstone specimens under different impact velocities

由图 1 可知,随着冲击速度的增大,砂岩试件的动态压缩峰值应变和最终应变呈减小的趋势。具体而言,冲击速度为 5 m/s、6 m/s、7 m/s、8 m/s 时,砂岩试件的动态压缩峰值应变分别为 0.006 1,0.006 1,0.005 4 和 0.006 0,最终应变分别为 0.005 9,0.005 1,0.004 2 和 0.003 9。与此同时,砂岩试件的动态强度随着冲击速度的增加逐渐增大,冲击速率为 5 m/s、6 m/s、7 m/s、8 m/s 时,砂岩试件的动态强度分别为 55.39 MPa、58.72 MPa、61.67 MPa 和 67.68 MPa。与冲击速度为 5 m/s 时的动态强度相比,其他冲击速度的强度分别增加了 6.01%、11.33% 和 22.19%。

根据弹性波理论,声波在不同介质中的传播速度不同,并且与介质的弹性模量和密度之间存在密切关系。因此,纵波波速可以用来表征砂岩试件内部的损伤情况。根据弹性模量定义损伤变量的方法,可以用以下公式表示砂岩试件内部损伤变量:

$$D=1-(v_A/v_B)^2 \tag{1}$$

式中:D 表示不同冲击速度条件下砂岩试件的内部损伤变量;v_A 表示冲击试验后砂岩试件的纵波波速;v_B 表示冲击试验前砂岩试件的纵波波速。

利用式(1)对冲击试验过程中砂岩试件的损伤变量进行统计分析,结果见表 2。由表 2 可知,随着冲击速度的增大,砂岩试件在冲击试验后的纵波波速呈现下降趋势,而其内部损伤变量则逐渐增大。

表 2 砂岩试样的动态力学和物理参数

Table 2 Dynamic mechanical and physical parameters of sandstone specimens

编号	冲击速度/(m/s)	动态强度/MPa	动态压缩峰值应变	v_B/(m/s)	v_A/(m/s)	D/($\times10^{-2}$)
H-0-1	0	—	—	2 941	—	0.00
H-0-2	0	—	—	2 956	—	0.00
H-0-2	0	—	—	2 981	—	0.00
H-5-1	5	55.39	0.006 1	2 976	2 957	1.27
H-5-2	5	54.72	0.006 2	2 996	2 975	1.40
H-5-3	5	55.18	0.006 1	2 932	2 911	1.43
H-6-1	6	58.72	0.006 1	2 952	2 915	2.49
H-6-2	6	58.37	0.006 1	2 975	2 935	2.67
H-6-3	6	59.61	0.006 2	2 975	2 930	3.00
H-7-1	7	61.67	0.005 4	2 950	2 759	12.53
H-7-2	7	61.84	0.005 3	2 961	2 776	12.11
H-7-3	7	62.35	0.005 5	2 923	2 741	12.07
H-8-1	8	67.89	0.006 0	2 935	2 497	27.62
H-8-2	8	68.12	0.006 1	2 986	2 549	27.13
H-8-3	8	66.23	0.005 9	2 992	2 544	27.70

为探究冲击损伤对岩石试件孔隙率的影响,本

文采用核磁共振技术对不同损伤条件下的岩石试件孔隙率进行测试。根据核磁弛豫原理，岩石中不同尺寸的孔隙所含流体具有不同的弛豫时间，因此在T_2(横向弛豫时间)谱曲线上呈现不同的分布位置[17]。核磁信号的峰值分布特征有助于分析岩石试件中微裂纹、孔隙、节理等微观缺陷的发育情况。峰面积反映了试件中微观缺陷的数量，峰宽则部分反映了微观缺陷结构的分布特性，峰的数量则表征了各层孔隙的连续性。图 2 展示了不同冲击速度条件下砂岩试件的孔隙结构分布特征。其中，T_2 值在 0.01～10 ms 范围内对应微观孔隙，10～100 ms 范围内为中孔隙，100～10 000 ms 范围内则为宏观孔隙。

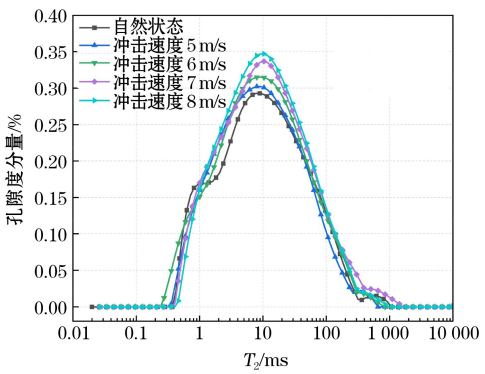


图 2　不同冲击速度条件下砂岩试件的孔隙分布特征

Fig.2　The pore distribution characteristics of sandstone specimens under different impact velocity conditions

由图 2 可知，随着冲击速度的增大，岩石试件内部的孔隙分布曲线峰值不断增大，自然状态和冲击速度分别为 5 m/s、6 m/s、7 m/s、8 m/s 时，孔隙度分量峰值分别为 0.293%、0.302%、0.315%、0.336% 和 0.347%；而在冲击速度达到 7 m/s 后，岩石试件内部的孔隙分布曲线面积显著增大；随着冲击速度的增大，岩石试件内部微观缺陷的尺寸也发生了较为显著的变化，未受冲击加载的岩石试件孔隙分布曲线与受循环冲击加载的岩石试件孔隙分布曲线存在较为显著的差异性。

岩样在进行冲击载荷试验时，矿物颗粒弱胶结面或孔洞边界的颗粒在冲击载荷作用下发生破裂，导致孔洞尺寸增大或沿孔洞边界产生微裂纹。随着冲击载荷的增大，矿物颗粒破裂产生的微裂纹也在逐渐增加。因此，孔隙率可以作为岩石微裂纹损伤的外在表现。上述试验结果表明，在冲击速度超过 5 m/s 时，砂岩内部矿物颗粒破裂产生微裂纹较为显著。

2.2　不同损伤状态下砂岩的特征应力演化特征

工程实践表明，爆破扰动会对巷道围岩力学性质产生显著的劣化效应，为了探究爆破扰动下巷道围岩的力学行为响应特征，本研究开展不同先期损伤(冲击加载损伤)条件下砂岩单轴压缩的静力学试验，对研究其特征应力演化特征具有重要的实践与理论意义。限于篇幅原因，本文仅展示了 H-0-1、H-5-1、H-6-1、H-7-1、H-8-1 试件在单轴压缩试验过程中的应力-应变曲线，如图 3 所示。

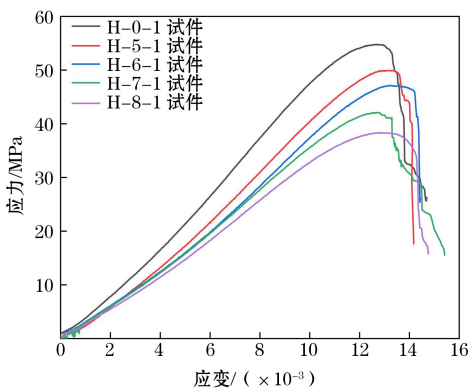


图 3　不同损伤状态下砂岩试件单轴压缩试验的应力-应变曲线

Fig.3　Stress-strain curves of uniaxial compression tests of sandstone specimens under different damage states

由图 3 可知，随着冲击速度的增大，砂岩试件单轴抗压强度在逐渐减小，峰值应变变化不显著。根据单轴压缩条件下砂岩试件的轴向应力-应变曲线变化特征，可以将全应力-应变曲线分为以下 5 个阶段：裂纹闭合阶段、线弹性变形阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹非稳定扩展阶段、峰后破坏阶段[10]。

目前，划分岩石特征应力阶段主要有以下 4 种方法：声发射法、移动点回归分析法、侧向应变差分法及裂纹体积应变法。其中，声发射法操作最为简便，但是其受试验环境影响较大，划分误差偏大。而裂纹体积应变法理论最为完善，受主观因素影响较小，在岩石力学与工程领域应用较为广泛。因此，本文将利用裂纹体积应变法对不同损伤状态下砂岩试件的特征应力点进行划分。由于裂纹体积应变法理论较为成熟，本文将不再对其原理进行赘述，详细推导过程请参考文献[10]。

本文利用裂纹体积应变法对不同损伤状态下砂岩试件的特征应力演化信息进行了统计分析，结果见表 3。

表 3 砂岩试件的特征应力分布规律

Table 3 The distribution law of characteristic stress of sandstone specimens

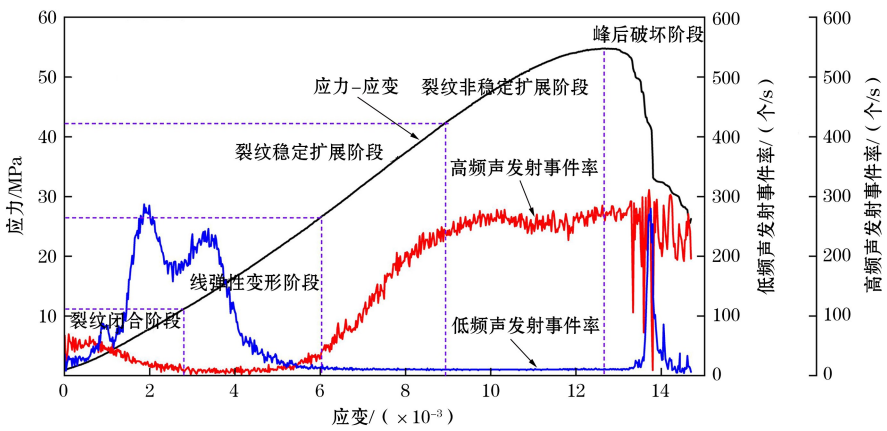
编号	冲击速度/(m/s)	峰值应变/($\times10^{-2}$)	σ_f/MPa	(σ_{cc}/σ_f)/($\times10^{-2}$)	(σ_{ci}/σ_f)/($\times10^{-2}$)	(σ_{cd}/σ_f)/($\times10^{-2}$)
H-0-1	0	1.47	54.75	21.43	51.76	78.93
H-0-2	0	1.46	53.81	21.75	51.42	79.02
H-0-3	0	1.47	55.23	21.35	51.36	78.62
H-5-1	5	1.47	49.93	22.63	50.21	76.43
H-5-2	5	1.46	50.26	22.33	50.41	76.21
H-5-3	5	1.47	51.27	22.31	50.35	76.34
H-6-1	6	1.47	47.65	23.59	49.98	75.31
H-6-2	6	1.47	48.31	23.68	49.93	75.24
H-6-3	6	1.47	48.52	23.84	49.63	75.23
H-7-1	7	1.54	42.05	23.17	45.36	68.52
H-7-2	7	1.53	41.68	23.35	45.65	68.47
H-7-3	7	1.54	42.53	24.56	44.85	67.28
H-8-1	8	1.48	38.22	25.47	42.62	65.84
H-8-2	8	1.49	37.21	25.11	42.31	64.33
H-8-3	8	1.49	37.43	24.88	42.28	64.38

注:σ_f 表示不同损伤状态下砂岩试件的峰值应力;σ_{cc} 表示不同损伤状态下砂岩试件的裂纹闭合应力;σ_{ci} 表示不同损伤状态下砂岩试件的起裂应力;σ_{cd} 表示不同损伤状态下砂岩试件的损伤应力。

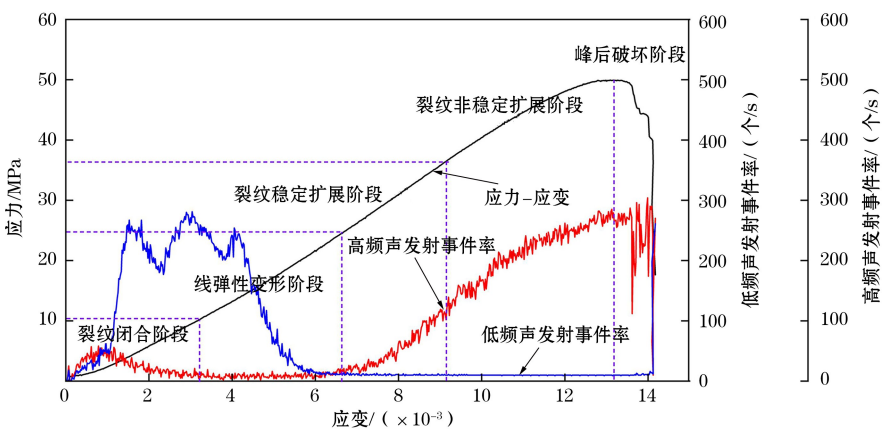
由表 3 可知,随着冲击速度的增大,砂岩试件裂纹闭合应力与峰值应力的比值在逐渐增大,起裂应力与峰值应力的比值以及损伤应力与峰值应力的比值均在逐渐减小。上述试验现象表明:动态扰动损伤对砂岩试件峰值应力与特征应力的演化存在着显著影响。

2.3 不同损伤状态下砂岩变形破坏过程中声发射响应特征

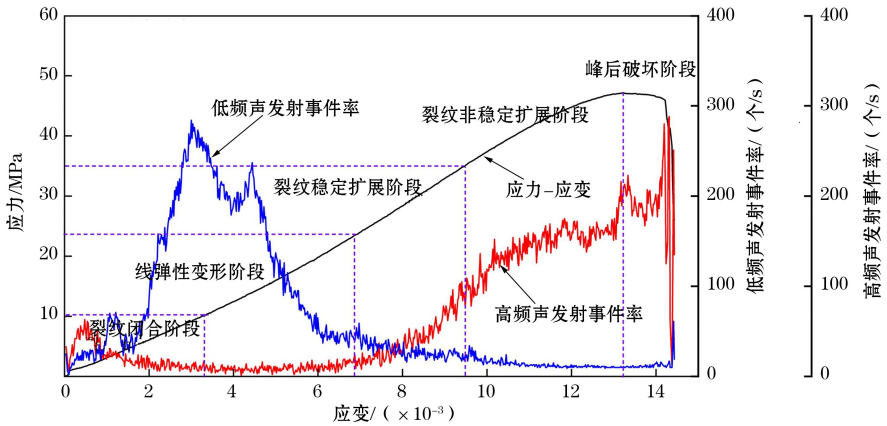
在岩石变形破坏过程中,声发射活动表现出显著的阶段性演化特征,其活动强度及其频率特性随岩石内部的损伤演化会发生显著的阶段性变化。相关研究表明,岩石试件内部颗粒间的摩擦作用产生的声发射信号具有频率低、能量低等特点,而岩石试件内部微裂纹孕育、扩展、合并及成核等演化活动过程中产生的声发射信号具有频率高、能量高等特点。本文根据声发射信号频率与岩石内部颗粒活动之间的关系,将主频分布在 0～90 kHz 范围内的声发射信号定义为低频声发射信号,主要是由岩石内部颗粒摩擦活动产生的;将主频分布在 90～500 kHz 范围内的声发射信号定义为高频声发射信号,主要是由岩石试件内部微裂纹活动产生的声发射信号。为了探究不同损伤状态下砂岩试件变形破坏过程中微裂纹的演化活动,本文以 H-0-1、H-5-1、H-6-1、H-7-1、H-8-1 试件为例,对高频声发射事件率与低频声发射事件率进行了统计分析,结果如图 4 所示。



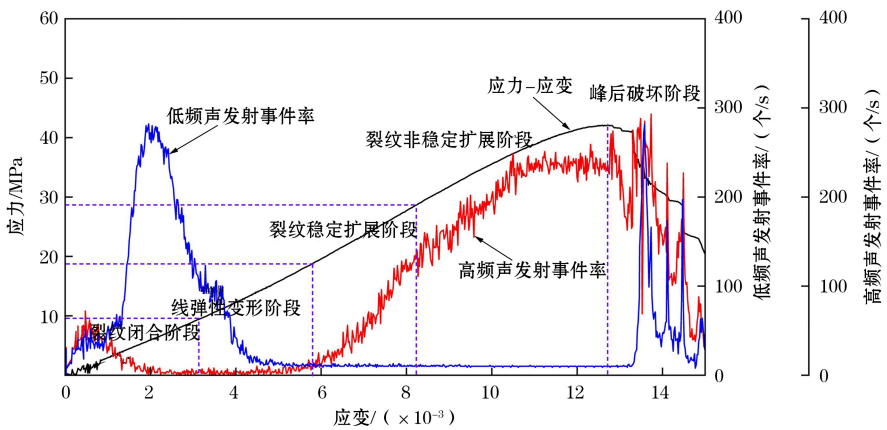
(a) H-0-1 试件



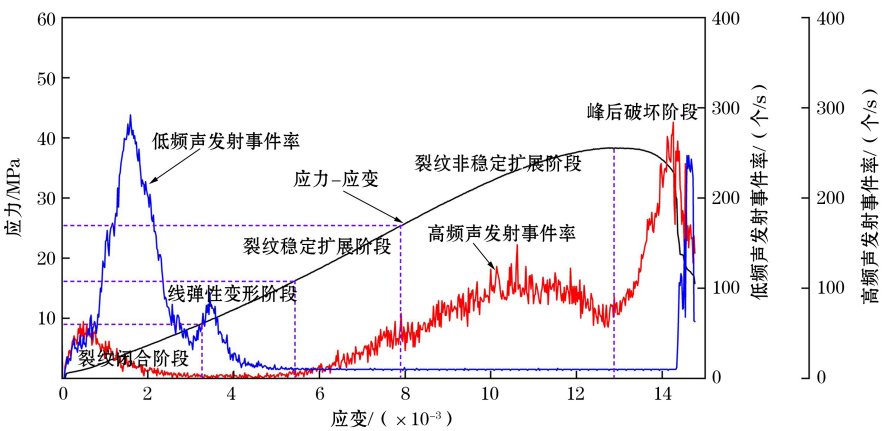
(b) H-5-1 试件



(c) H-6-1 试件



(d) H-7-1 试件



(e) H-8-1 试件

图 4 不同损伤状态下砂岩试件的声发射活动响应特征

Fig.4 The acoustic emission activity response characteristics of sandstone specimens under different damage states

由图 4 可知,在裂纹闭合阶段,砂岩试件内部微裂纹在闭合过程中颗粒之间相互作用,产生了大量的低频声发射事件,弱胶结颗粒在摩擦作用过程中也会发生滑移破坏,产生部分高频声发射活动;在线弹性变形阶段,声发射活动相对较少,仅出现少量的低频、低幅值的微弱信号,反映了微观缺陷的调整和颗粒微变形;在裂纹稳定扩展阶段,随着载荷应力的增加,进入微裂纹萌生阶段,局部应力集中诱发微裂纹初始生成,声发射事件显著增多,以高频声发射信号为主;在裂纹非稳定扩展阶段,随着载荷应力的增加,进入裂纹扩展阶段,微裂纹相互作用并逐渐向宏观裂纹发展,声发射活动强度显著增强,以高频声发射事件为主导,表征裂纹滑移及较大规模破裂面形成;在峰后破坏阶段,裂纹快速扩展并贯通,声发射

活动达到峰值,伴随着大量的低频与低能量声发射事件集中释放,声发射事件时空分布逐渐局域化于主裂纹区,累积声发射事件数与能量释放曲线呈现突增并趋于饱和。这种声发射活动从随机分布向局域化聚集的演化规律,反映了岩石从弹性变形向宏观破坏转变的全过程,对揭示岩石破坏机制及工程稳定性预警具有重要意义。

3 讨论

综合分析表 2、表 3 与图 3 可知,动态扰动损伤与砂岩试件的特征应力阈值之间存在着内在联系。为了进一步探究先期动态损伤对砂岩试件特征应力的影响,对裂纹闭合应力与峰值应力比值、起裂应力与峰值应力比值、损伤应力与峰值应力比值进行统计分析,如图 5 所示,对动态扰动损伤与试件强度进行了统计分析,结果如图 6 所示。

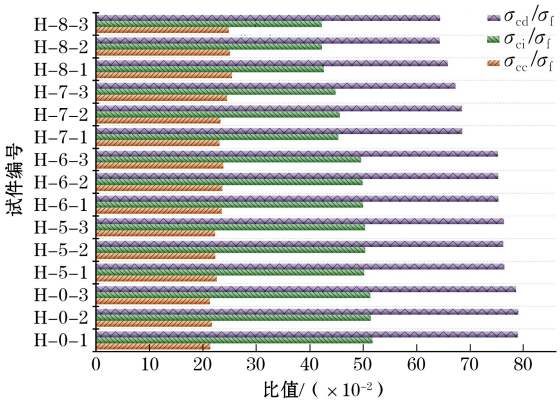


图 5 不同损伤状态砂岩试件特征应力与峰值应力比值

Fig.5 The ratio of characteristic stress to peak stress of sandstone specimens under different damage states

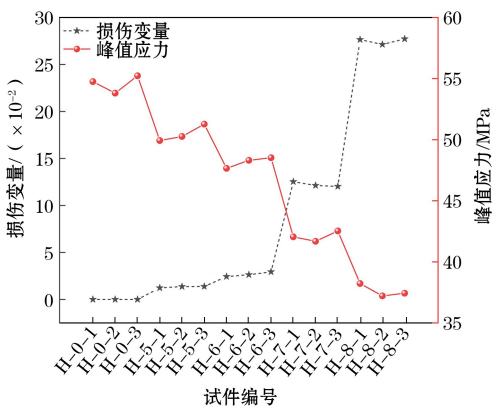


图 6 砂岩试件的动态扰动损伤与峰值应力

Fig.6 Dynamic disturbance damage and peak stress of sandstone specimens

砂岩是一种微裂纹非均匀分布的沉积岩,试验加载过程中不同损伤状态下砂岩试件会经历裂纹闭合阶段、线弹性变形阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹非稳定扩展阶段与峰后破坏阶段。

在裂纹闭合阶段,随着初始动态损伤的增大,砂岩试件内部的微裂纹数量也在逐渐增大,微裂纹与裂隙界面间的摩擦力逐渐增大,以抵抗砂岩试样颗粒间滑移运动。进而形成了随着动态扰动损伤增大,裂纹闭合应力与峰值应力比值也呈逐渐上升的变化趋势。

随着初始动态损伤的增大,砂岩试件内部的微裂纹数量也在逐渐增大,导致砂岩试件在线弹性变形阶段的有效弹性模量在逐渐减小,持续时间缩短,形成了起裂应力与峰值应力比值逐渐下降的变化趋势。

在裂纹稳定扩展阶段,砂岩试件内部原生微裂纹开始稳定扩展,并出现新的次生微裂纹。随着微裂纹数量和尺寸的增加,微裂纹逐渐合并,形成宏观裂纹带,最终导致砂岩试件发生失稳破坏。

4 结论

通过对砂岩开展动态冲击试验和单轴压缩试验,讨论了不同冲击速度下试样的损伤程度和动力学特性,分析了单轴压缩下砂岩的声发射参数特征,主要结论如下。

(1) 随着冲击速度的增大,砂岩试件在冲击试验后的纵波波速呈现下降趋势,表明其内部损伤逐步累积,损伤变量随之增大。

(2) 在冲击载荷作用下,随着冲击速度的增加,砂岩的动态强度逐渐增大;在单轴压缩作用下,其峰值应力随冲击速度增加逐渐减小,峰值应变变化不明显。

(3) 不同速度冲击损伤状态下,随着动态扰动损伤的增大,砂岩试样在单轴压缩作用过程中的裂纹闭合应力与峰值应力的比值在逐渐增大,起裂应力与峰值应力的比值以及损伤应力与峰值应力的比值均在逐渐减小。

(4) 单轴压缩条件下,不同动态扰动损伤的砂岩试件声发射活动表现出显著的阶段性特征。在裂纹闭合阶段,产生大量低频声发射事件,表明裂纹界

面接触摩擦力逐渐增强;在线弹性变形阶段,声发射活动较少,仅有少量低频、低幅值的微弱信号;在裂纹稳定扩展阶段,声发射事件显著增多,以高频声发射信号为主;在裂纹非稳定扩展阶段,声发射活动强度显著增强,高频声发射事件进一步占据主导地位,裂纹扩展趋于失控状态。

本研究揭示了动态扰动损伤对砂岩力学性能和声发射特征的显著影响,明确了砂岩在不同损伤状态下的力学响应规律及其微破裂过程的阶段性特征,为动态扰动环境下岩石工程的损伤评估和灾害预防提供了理论依据。

参考文献(References):

[1] 聂根良,程晓红,周文海,等.冲击载荷作用下炮孔近区节理岩体的动力响应[J].矿业研究与开发,2023,43(11):72-80.
NIE Genliang, CHENG Xiaohong, ZHOU Wenhai, et al. Dynamic response of jointed rock near blast hole under impact load[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):72-80.

[2] 张亚宾,艾蕊,谭志远.冲击荷载下石灰岩裂纹扩展规律研究[J].矿业研究与开发,2021,41(10):79-83.
ZHANG Yabin, AI Rui, TAN Zhiyuan. Study on crack propagation law of limestone under impact load[J]. Mining Research and Development,2021,41(10):79-83.

[3] 朱建波,付乙梓,李瑞,等.干湿循环与动态压缩耦合作用下砂岩力学特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(增刊1):3558-3566.
ZHU Jianbo, FU Yizi, LI Rui, et al. Experimental study on mechanical characteristics of sandstone under drying-wetting cycles and dynamic compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(Suppl.1):3558-3566.

[4] 马智会,马智勇,潘荣锟,等.三维静载与循环冲击共同作用下组合煤岩体力学特性试验研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(8):58-67.
MA Zhihui, MA Zhiyong, PAN Rongkun, et al. Experimental study on mechanical properties of coal-rock combined body subjected to combined action of three-dimensional static load and cyclic impact[J]. Journal of Safety Science and Technology,2024,20(8):58-67.

[5] 李乐,王成,张红成,等.冲击载荷下砂岩的动态力学特性及破坏机制[J].煤炭工程,2023,55(9):140-145.
LI Le, WANG Cheng, ZHANG Hongcheng, et al. Dynamic mechanical properties and failure mechanism of sandstone under impact loads[J]. Coal Engineering, 2023, 55(9): 140-145.

[6] 耿昊,杨江坤,宋彦琦,等.泥岩动态冲击力学响应及裂纹演化试验研究[J].金属矿山,2023(10):45-52.
GENG Hao, YANG Jiangkun, SONG Yanqi, et al. Experimental study on dynamic lmpact mechanical response and crack evolution of mudstone[J]. Metal Mine,2023(10):45-52.

[7] 孔祥国,杨送瑞,王恩元,等.冲击载荷瞬时扰动原煤试样破裂演化及瓦斯放散特征研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(6):1384-1394.
KONG Xiangguo, YANG Songrui, WANG Enyuan, et al. Fracture evolution and gas emission characteristics of raw coal samples subjected to instantaneous disturbance of impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(6):1384-1394.

[8] 张人凡,朱哲明,王飞,等.冲击载荷作用下黑砂岩动态断裂参数的分形修正[J].爆炸与冲击,2022,42(7):16-29.
ZHANG Renfan, ZHU Zheming, WANG Fei, et al. Fractal correction of dynamic fracture parameters of black sandstone under impact loads[J]. Explosion and Shock Waves,2022,42(7):16-29.

[9] 张亚宾,周建,艾蕊,等.冲击载荷下石灰石力学特性与能耗规律研究[J].工程爆破,2022,28(2):15-20.
ZHANG Yabin, ZHOU Jian, AI Rui, et al. Study on mechanical properties and energy onsumption law of limestone under impact load[J]. Engineering Blasting,2022,28(2):15-20.

[10] 杨道学.基于深度学习的岩石微破裂演化声发射行为特征[D].赣州:江西理工大学,2021.
YANG Daoxue. Acoustic emission behavior characteristics of rock micro-fracture evolution based on deep learning[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2021.

[11] 程虹铭,杨小彬,杨东辉,等.单轴压缩下裂隙砂岩的能量转化特征及倾角效应[J].煤炭工程,2023,55(10):143-148.
CHENG Hongming, YANG Xiaobin, YANG Donghui, et al. Energy conversion characteristics and dip effect of fractured sandstone under uniaxial compression[J]. Coal Engineering,2023,55(10):143-148.

[12] 李东文,赵光明,刘之喜,等.单轴压缩下岩石全应力应变过程中能量演化特征[J].煤矿安全,2023,54(2):135-144.
LI Dongwen, ZHAO Guangming, LIU Zhixi, et al. Characteristics of energy evolution during total stress-strain in rocks under uniaxial compression[J]. Safety in Coal Mines,2023,54(2):135-144.

[13] 杨超,许轩,王乐华,等.不同特征应力区间单裂隙砂岩与完整岩石蠕变特性的相关关系[J].岩石力学与工程学报,2022,41(7):1347-1357.
YANG Chao, XU Xuan, WANG Lehua, et al. Relationship between creep characteristics of intact rock and single-flawed sandstone under different critical stress intervals[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(7):1347-1357.

[14] 纪洪广,付桢,张月征,等.花岗岩破裂过程中“声发射-电阻率-波速”演化特征研究及工程探测应用[J].中国矿业大学学报,2024,53(5):872-888.
JI Hongguang, FU Zhen, ZHANG Yuezheng, et al. Characterisation of “acoustic emission-resistivity wave velocity” evolution in granite rupture and application to engineering detection[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(5):872-888.

[15] 陈旭,肖义,汤明高,等.多级等幅循环荷载作用下砂岩变形、渗透及声发射特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(8):1923-1935.
CHEN Xu, XIAO Yi, TANG Minggao, et al. Experimental study on deformation, permeability and AE characteristics of sandstone under multi-stage cyclic loading with a constant amplitude[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(8):1923-1935.

[16] 刘鑫锦,苏国韶,李小玉,等.中间主应力对花岗岩双轴压缩破坏过程的声发射演化特征影响[J].河南科技大学学报(自然科学版),2024,45(1):79-87+97+9-10.
LIU Xinjin, SU Guoshao, LI Xiaoyu, et al. Influence of intermediate principal stress on acoustic emission evolutionary characteristics of granite biaxial compression failure process[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science),2024,45(1):79-87+97+9-10.

[17] 赵延林,谭涛,张春阳,等.水-力耦合作用下砂岩力学特性与能量演化及强度准则适用性分析[J].煤炭学报,2023,48(9):3323-3335.
ZHAO Yanlin, TAN Tao, ZHANG Chunyang, et al. Mechanical properties and energy evolution and the applicability of strength criteria of sandstone under hydro-mechanical coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(9):3323-3335.