深部砂岩冲击动力破坏扩展特征提取算法

张小千，张 恒，张 巍，张保良

（聊城大学 建筑工程学院，山东 聊城 252000）

摘 要：针对深部地下工程建设扰动导致深部砂岩应力平衡破坏、产生微裂隙并快速扩展，且单一通道无法充分提取砂岩冲击动力破坏细微扩展特征、提取的边缘细节模糊的问题，提出了一种深部砂岩冲击动力破坏扩展特征提取算法。首先，利用冲击力试验系统对向砂岩试样施加不同的冲击动力，获取冲击破坏试样Y_1、Y_2、Y_3；其次，基于一维应力波理论和能量守恒定律获取深部砂岩试样冲击动力波吸收能量；然后，利用Matlab软件中的改进引导滤波方法对图像的高频分量进行边界增强和边缘伪影抑制（BEEPS）滤波处理以去除伪边缘；最后，将滤波处理后的图像与吸收能量输入Matlab软件驱动的先验学习网络，采用双卷积通道提取图像特征，利用卷积通道1提取并融合特征获取特征图，利用卷积通道2加权聚合得到残差特征图。在此基础上，通过分析像素点余弦相似度，提取到多尺度冲击动力下的细微扩展特征。试验结果显示：通过冲击试验能够获取砂岩试样在不同动力条件下的破坏能量分布情况；能够有效处理图像中的干扰噪声，并且更好地刻画冲击破坏的边缘细节，双卷积通道的余弦相似度高达90%，可准确提取试样Y_1、Y_2、Y_3各自的扩展特征。

关键词：深部砂岩；冲击动力破坏；扩展特征提取；冲击试验；破坏能量；Matlab软件

中图分类号：TP391 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2026)04-0992-07

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250096

Algorithm for extracting extended characteristics of impact dynamic damage in deep sandstone

ZHANG Xiao-qian, ZHANG Heng, ZHANG Wei, ZHANG Bao-liang

(*School of Civil and Architectural Engineering, Liaocheng University, Liaocheng* 252000, *China*)

Abstract: Aiming at the problems that the disturbance caused by the construction of deep underground projects leads to the destruction of the stress balance of deep sandstone, the generation and rapid expansion of microcracks, and that a single channel cannot fully extract the subtle expansion characteristics of sandstone impact dynamic failure, resulting in blurred extracted edge details, an extended feature extraction algorithm for dynamic failure of deep sandstone was proposed. The impact test system was used to apply different impact forces to sandstone samples, and the impact failure samples Y_1, Y_2 and Y_3 were obtained. Based on one-dimensional stress wave theory and energy conservation law, the energy absorbed by shock dynamic wave of deep sandstone samples was obtained. The improved guided filtering method in

收稿日期：2025-02-06.

基金项目：国家自然科学基金项目(52304136).

作者简介：张小千(1990-)，女，讲师，博士. 研究方向：煤岩动力灾害，岩土电化学理论. E-mail：sdslcszxq@163.com

Matlab software was used to process the pseudo-edge of the high frequency component of the image by Boundary Enhancement and Edge Pseudomasking Suppression (BEEPS) filtering. The filtered images and absorbed energy were input into a prior learning network driven by Matlab software. Dual convolution channels were used to extract image features, convolutional channel 1 was used to extract and merge features to obtain feature maps, and the residual feature maps were obtained by weighted aggregation of convolutional channel 2. By analyzing the cosine similarity of pixels, the subtle expansion features under multi-scale impact forces were extracted. The test results show that the failure energy distribution of sandstone samples under different dynamic conditions can be obtained by impact test. It can effectively process the interference noise in the image and better characterize the edge details of impact damage. The cosine similarity of the double-convolution channel is as high as 90%, and the extended features of Y_1, Y_2 and Y_3 samples can be accurately extracted.

Key words: deep sandstone; impact dynamic damage; extended feature extraction; impact test; destruction of energy; Matlab software

0　引　言

随着深部矿井开采、深部隧道掘进、地下能源存储等深部地下工程建设的持续推进,工程所处周围岩体(尤其是深部砂岩)会受到强烈扰动。频繁的应力交替变化对深部砂岩产生了诸多影响[1]:一方面,会导致砂岩累积损伤,使其物理力学性能逐渐弱化;另一方面,砂岩内部会产生微裂隙并迅速扩展[2]。这些微裂隙的产生和扩展改变了砂岩的内部结构,从微观层面破坏了砂岩的完整性[3]。这种内部结构的改变不仅影响砂岩自身的力学性质,还可能引发冲击地压等更严重的工程灾害。冲击地压一旦发生,会对深部地下工程中的人员安全、设备设施造成巨大破坏。因此,深入了解深部砂岩在冲击动力作用下的破坏扩展特征,对保障深部地下工程安全稳定运行至关重要。

杨妙等[4]通过高重频平台获取岩石样品光谱图像,将其输入一维卷积神经网络中,获取岩石的岩性。单一一维通道卷积神经网络在提取这些细微特征时能力有限,无法捕捉到岩心中极微小的扩展特征。孙浩等[5]以岩石裂隙图像为基础,将其输入 AttentionR2U-net 网络中,通过该网络识别图像中岩石表面的节理特征,获取该特征的详细参数,依据这些参数分析岩石裂缝破坏结构的特征。砂岩在冲击动力作用下会发生复杂的破坏,产生多种形态的裂缝。然而,AttentionR2U-net网络的单一通道无法充分捕捉这些复杂的特征。郝嘉欣等[6]增强处理砂岩图像样本,将其输入颗粒及裂隙分析系统(Particle and cracks analysis system,PCAS)软件中,自动提取各种孔隙特征参数,依据提取的参数分析岩石结构特征。在图像增强处理过程中,会丢失一些重要的特征信息,同时引入噪声干扰。这会影响后续 PCAS 软件对微小扩展特征提取的精度和准确性。何学秋等[7]采集砂岩并对其进行切割处理后制备试验样品,对砂岩样品进行单轴加载或其他形式的加载,使用声发射传感器同步采集砂岩样品的声发射信号,提取声发射信号的梅尔倒谱系数,并分析该系数在加载过程的变化规律,判断砂岩发生失稳破坏时的特征情况。在砂岩破坏过程中,裂纹的扩展和贯通通常伴随着声发射信号的急剧变化。然而,该方法忽略了对微小扩展特征的分析,降低了砂岩特征分析结果的可靠性。

在以上研究方法的基础上,本文提出了深部砂岩冲击动力破坏扩展特征提取方法。通过 Matlab 的执行机器学习算法更好地提取破坏扩展特征。

1　冲击动力下深部砂岩破坏扩展特征提取

1.1　深部砂岩试样获取

采用水钻法获取某地区地下 1 000 m 深层的砂岩芯块,选取完整度较高、没有发生钻取损坏的芯块进行切割和打磨处理,制备成尺寸统一的圆柱形试样,并且圆柱体的上、下两端平面需保持较高的平整度,粗糙度、不平整度不超过 0.03 mm,最终制得的圆柱形试样直径为 60 mm,高度为 25 mm。

将打磨后的试样放入烘箱中,在温度为

105 ℃的恒定条件下进行烘干处理,持续时间为48 h;烘干结束后,将试样取出置于正常室温下冷却,并测试其冷却后的干密度,依据测试结果筛选满足标准的试样,剔除离散性较大的试样,最终保留满足物理性能标准的试样,该试样的物理性能参数如表1所示。

表1 保留的试样的物理性能参数

Table 1 Physical performance parameters of retained samples

参数	数值
密度/(kg·m^{-3})	2 390.5
孔隙率/%	7.62
静态抗压强度/MPa	76.66
静态变形模量/GPa	4.64
动态抗压强度/MPa	97.55
动态变形模量/GPa	19.33

1.2 冲击动力破坏

1.2.1 深部砂岩试样冲击动力波吸收能量测定

深部地下工程建设对周围深部砂岩产生强烈扰动,打破其应力平衡,使其频繁经历应力交替变化。在这个过程中,砂岩内部产生微裂隙并迅速扩展,进而导致其内部结构发生劣化和损伤。冲击动力波吸收能量作为一个重要物理量,能够为特征提取提供新的维度和信息。因此,对上述保留的砂岩试样进行冲击试验,通过搭建岩土冲击力试验系统,获取试样在冲击力下的入射波、透射波、表面位移和变形图像等关键数据,测定冲击动力波吸收能量,能够为理解这一复杂损伤过程提供关键信息。

通过岩土冲击力试验系统进行冲击力施加,并获取试样在冲击力下的入射波、透射波以及试样的表面位移和变形图像,冲击力试验系统结构示意图如图1所示。

该试验平台主要由数字图像系统、应变检测仪、测速系统和冲击发射系统等多个部分组成,冲击试验时,入射波和透射波通过应变检测仪获取[8],表面位移和变形图像则通过数字图像系统中的高速摄像机获取,为保证其获取结果的可靠性,该相机的拍摄频次为10^5帧/s,以便更精准地量化试样表面的变化程度[9]。

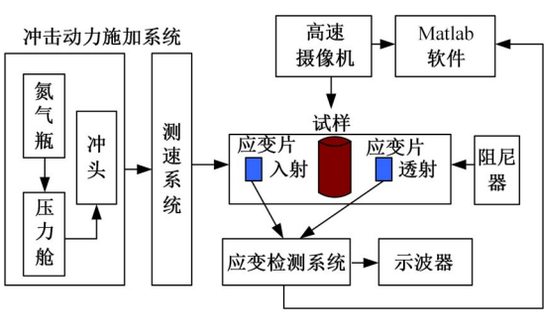


图1 冲击力试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of impact test system

冲击试验时,入射杆和透射杆受到相同的一维应力,因此两者满足一维应力波理论,依据该理论,结合应变测量系统获取的数据以及试验装置、试样的相关参数[10],计算试样在冲击力作用下的动态应力情况$\beta(t)$、应变情况$\varepsilon(t)$以及应变率$\dot{\varepsilon}(t)$,以此分析其应力与应变之间的关联:

$$\beta(t)=\frac{E_t A_1}{2A_2}\left[\varepsilon_r(t)+\varepsilon_o(t)+\varepsilon_e(t)\right] \tag{1}$$

$$\varepsilon(t)=\frac{V_t}{L_s}\int_0^t\left[\varepsilon_r(t)-\varepsilon_o(t)-\varepsilon_e(t)\right]\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}(t)=\frac{V_t}{L_s}\left[\varepsilon_r(t)-\varepsilon_o(t)-\varepsilon_e(t)\right] \tag{3}$$

式中:E_t为时间t的一维应力;A_1为弹性杆横截面面积;A_2为试样横截面面积;V_t为纵波波速,其对应弹性杆;L_s为试样长度;$\varepsilon_r(t)$、$\varepsilon_o(t)$、$\varepsilon_e(t)$均为应变值,分别对应入射、反射和透射产生的波,且满足$\varepsilon_r(t)+\varepsilon_o(t)=\varepsilon_e(t)$的关系。

在式(1)~(3)的基础上,结合能量守恒定律可获取入射、反射以及透射状态下产生的波能量Q_r、Q_o、Q_e,其计算公式分别为:

$$Q_r=\frac{A_1V_t}{E_t}\int_0^t\beta_r^2(t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

$$Q_o=\frac{A_1V_t}{E_t}\int_0^t\beta_o^2(t)\mathrm{d}t \tag{5}$$

$$Q_e=\frac{A_1V_t}{E_t}\int_0^t\beta_e^2(t)\mathrm{d}t \tag{6}$$

$$Q_\Sigma=Q_r-Q_o-Q_e \tag{7}$$

式中:$\beta_r(t)$、$\beta_o(t)$、$\beta_e(t)$均为冲击作用下产生的应力,分别对应入射、反射和透射;Q_Σ为吸收能量。

1.2.2 深部砂岩冲击破坏试验过程

通过图1所示试验平台进行试验时,需结合试验相关规范标准确定试验步骤,具体如下所示。

步骤1 对1.1节保留的试样进行编号、备用。

步骤2 对子弹加速管、入射杆以及透射杆进行检查,判断三者是否位于同一水平线上,如有偏差则进行调整校正;同时,检查对应变仪和应变片安装位置是否精准,对不精准的位置进行校准[11]。

步骤 3　为降低冲击试验过程中产生的摩擦效应，试验前将黄油涂抹在试样的两端；在入射杆与透射杆之间放置砂岩试样，确保放置位置无误后进行冲击加载。

步骤 4　依次启动轴压液压机、围压液压机以及渗透水压加载系统，依据《工程岩体试验方法标准》（GB/T 50266－2013）设定 3 种压力的加载值，并结合设定结果依次进行轴压、围压以及渗透水压力的施加，均满足设计值后进入持压阶段，直到完成试验。

步骤 5　启动温度控制系统，按照《天然石材试验方法第 16 部分：线热膨胀系数的测定》（GB/T 9966.16－2021）和试验需求设定指定温度值，设定后则进入加热阶段，满足设定值后停止加热，在高温度下完成后续试验。

步骤 6　运行空气压缩机，通过压缩的方式使空气进入压缩舱内，该舱与发射装置连接；按照《岩石动力特性试验规程》（T/CSRME 001－2019）设定压力表；满足设定值时，立即关闭空气压缩机，准备进行试样冲击试验。

步骤 7　在 Matlab 软件中，对试验所需的动态应力情况 $\beta(t)$、应变情况 $\varepsilon(t)$ 以及应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$、Q_r、Q_o、Q_e 等波形参数进行设置。

步骤 8　在压力舱作用下产生冲击气压，以此促使子弹发射，对试样进行动态冲击作用，获取该过程中的相关数据。冲击完成后进行舱内压力卸载，卸载的顺序依次为围压、渗透水压、轴压；卸载完成后获取冲击后的试样进行拍照存档，将获取的图像用于后续冲击动力破坏扩展特征提取。

按照上述步骤进行冲击试验，在 3 种不同冲击气压下完成，获取 3 种不同冲击力破坏的砂岩试样。试验设定的相关试验参数如表 2 所示。

表 2　冲击试验相关参数

Table 2　Relevant parameters of impact test

试验参数	砂岩试样		
	Y_1	Y_2	Y_3
围压/MPa	20	20	20
轴压/MPa	20	20	20
渗透水压/MPa	10	10	10
温度/℃	30	30	30
冲击气压/MPa	1.5	2.0	2.5

1.3　冲击动力破坏细微扩展特征双卷积通道提取

应力的交替变化和累积损伤的持续加剧，会促使砂岩内部产生微裂隙。在应力持续作用下，微裂隙快速扩展，进而改变砂岩内部结构。这类细微的裂隙扩展特征，是解析砂岩冲击动力破坏机制的核心依据。而冲击动力波的吸收能量与砂岩内部结构的演化直接相关。吸收能量 Q_Σ 的变化能够反映砂岩内部微裂隙的产生、扩展以及相互作用等情况。当吸收能量突然增加时，说明砂岩内部有新的微裂隙大量生成或者原有微裂隙快速扩展。因此，利用 Matlab 软件中的改进引导滤波方法处理砂岩试样在冲击动力作用下产生的图像[12]，将滤波处理后的图像与吸收能量 Q_Σ 输入至驱动先验学习网络，采用双卷积通道捕获破坏区域的复杂纹理变化特征。通过多尺度分析和特征图重构，完成试样多尺度的冲击动力破坏扩展特征提取。

由于冲击动力作用下砂岩试样会产生动态冲击，高速摄像头在采集图像时会导致细节对比度较低等情况，使图像细节信息不突出。因此，为保证扩展特征提取效果，利用 Matlab 软件中的改进引导滤波方法对图像进行处理，提升图像的质量、降低图像中的噪声干扰。通过该方法对图像进行分解，使其形成高频和低频两个部分：高频部分包含冲击破坏目标；低频部分则是干扰信号。对高频分量进行边界增强和边缘伪影抑制（Boundary enhancement and edge pseudomasking suppression，BEEPS）滤波处理[13]，以此处理图像的伪边缘，其计算公式为：

$$I_s = f_s(I) \tag{8}$$

式中：I 为原始图像；$f_s(\cdot)$ 表示滤波处理；I_s 为处理后的图像。

对 I_s 进行 Sobel 和均值两种滤波，以此计算 Sobel 滤波窗口恒定系数 α_k，其计算公式为：

$$\begin{cases} I_o = f_e(I_s) \\ \alpha_k = f_o(I_o) \end{cases} \tag{9}$$

式中：$f_e(\cdot)$ 和 $f_o(\cdot)$ 分别表示 Sobel 和均值两种滤波；I_o 为 Sobel 滤波后的图像。

依据 α_k 的值计算均值滤波窗口恒定系数 κ_k，其计算公式为：

$$\kappa_k = C \cdot \alpha_k \cdot I_o \tag{10}$$

式中：C 为窗口尺寸。

依据 α_k 和 κ_k 完成获取最终处理后的图像，公式为：

$$\hat{I}_o = \kappa_k + \alpha_k I_o \tag{11}$$

式中:$\hat{I}_o$为处理后图像。

完成图像滤波处理后,通过Matlab软件驱动先验学习网路进行砂岩试样的冲击动力破坏扩展特征提取[14],将处理后图像$\hat{I}_o$和吸收能量Q_Σ作为网络输入,为精准、可靠地提取试样冲击动力破坏过程中的特征动态变化,该网络采用双卷积通道进行图像特征提取,从而高效捕获破坏区域的复杂纹理演化特征。

卷积通道1是通过拆分卷积内核实现特征的高效提取,即将$\hat{I}_i$进行拆分,使其形成数个通道子内核,采用不同的扩张率提取各子内核的特征信息,并对各内核提取的特征进行融合以获取特征图Y_o;卷积通道2是利用卷积和sigmoid运算获取图像空间变换的门控值Y_e,并采用加权的方式完成Y_o和Y_e的聚合处理,以此获取融合后的残差特征图Y_ε,其计算公式为:

$$Y_\varepsilon = Q_\Sigma\left[\hat{I}_i \otimes Y_e + Y_o \otimes (1 - Y_e)\right] \tag{12}$$

式中:$\otimes$表示聚合操作。

获取残差特征图Y_ε后,为全面分析破坏扩展特征的变化趋势,并挖掘不同尺度特征之间的关联性,首先获取Y_ε中的像素点,利用softmax计算其余弦相似度,依据该相似度确定特征图提取的补丁,再依据该补丁信息完成特征图重构,得到重构特征图$\tilde{Y}$;随后,对其进行不同扩张率、不同空洞卷积处理,完成试样多尺度的冲击动力破坏扩展特征$\widehat{Y}_i$提取,其计算公式为:

$$\widehat{Y}_i = \eta\left[w_i\left(Y_\varepsilon \otimes \tilde{Y}_i \otimes \xi_i\right)\right] \tag{13}$$

式中:η为卷积操作;w_i为权重系数;ξ_i为扩张率。

依据式(13)完成试样多尺度的冲击动力破坏扩展特征$\widehat{Y}_i$提取后,借助Matlab软件绘制特征提取结果。

2 结果分析

2.1 试样冲击动力试验结果分析

为验证本文冲击试验的合理性,依据1.2节的试验方法进行试验,以此分析砂岩试样在冲击动力作用下的破坏情况;计算试样的动态应变率$\dot{\varepsilon}(t)$、Q_r、Q_o、Q_e,以此分析砂岩在不同冲击速度下的能量分布情况,并依据分析结果判定该试验方法能否有效开展砂岩试样破坏测试,结果如表3所示。

由表3可知:随着冲击速度的增大,动态应变率呈逐步上升趋势,与此同时,入射能Q_r以及透射能Q_e也随之增大,而反射能Q_o变化幅度较小,始终维持在15~18 J。因此,该试验能够进行砂岩试样的破坏测试,获取其破坏状态的能量分布情况,为后续扩展特征提取提供可靠依据。

表3 砂岩在不同冲击速度下的能量分布情况

Table 3 Energy distribution of sandstone at different impact velocities

冲击速度/(m·s^{-1})	动态应变率/s^{-1}	入射能/J	透射能/J	反射能/J
6.0	82.3	98.6	48.6	17.5
6.2	85.9	103.3	52.5	18.3
6.5	97.2	112.5	59.1	15.5
7.2	100.8	122.8	60	15.8
7.6	118.1	155	90.3	14.6
8.5	125.3	185	110.1	14.3
9.0	131.6	192.4	114.7	15.5
9.5	135.9	204.3	123.9	15.1

2.2 冲击破坏图像处理效果分析

在进行砂岩试样冲击破坏扩展特征提取前,需对冲击后试样的原始图像进行滤波处理。为验证预处理效果,随机选取一幅试样图像,采用本文方法进行处理,并对比分析处理前、后的效果,结果如图2所示。

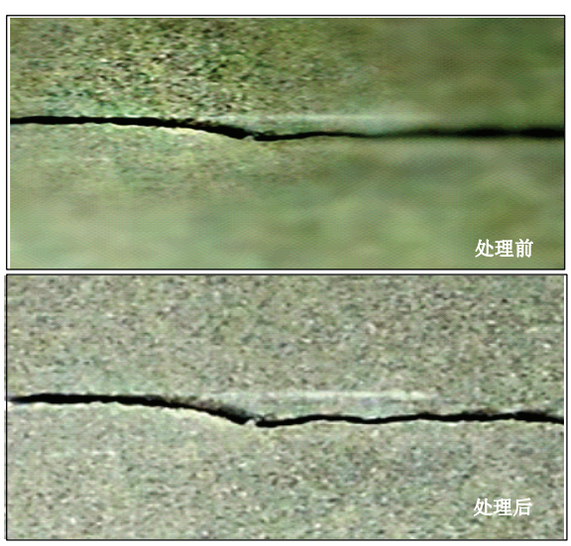


图2 冲击后的试样图像滤波处理结果

Fig. 2 Filter processing results of the sample image after impact

分析图2可知:利用Matlab软件进行试样冲击破坏图像处理后,能够有效处理图像中的干扰噪声,并且更好地刻画冲击破坏的边缘细节,为后续扩展特征提取提供可靠依据。

2.3　双卷积通道结果分析

针对深部砂岩冲击动力破坏扩展特征提取，不同通道输出的特征向量，可从多维度表征砂岩的破坏演化特征。余弦相似度能够有效衡量提取的特征向量在方向上的相似程度，且不受向量幅值影响。余弦相似度值越大，表明该方法在捕捉深部砂岩冲击动力破坏扩展特征方面的一致性越强，能够更有效地提取反映砂岩破坏特征的关键信息。为验证本文方法的有效性，采用余弦相似度对单一通道和双卷积通道的提取效果进行对比分析，将文献[4]提出的一维卷积神经网络作为对比方法，试验结果如图3所示。

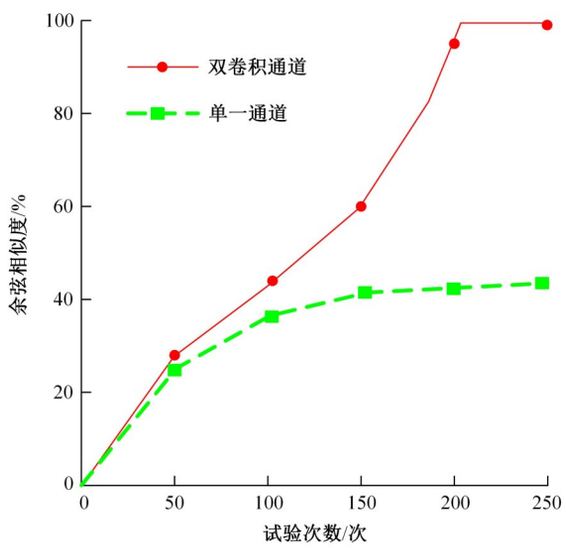


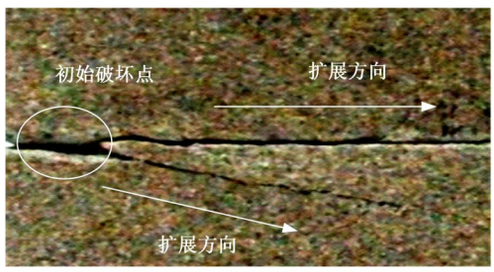
图3　双卷积通道结果余弦相似度分析

Fig. 3　Cosine similarity analysis of double convolution channel results

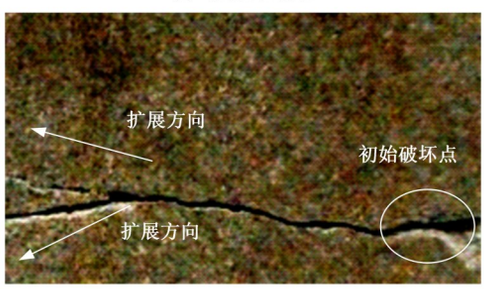
由图3可知，本文方法的余弦相似度更高，表明其在捕捉深部砂岩冲击动力破坏扩展特征时，相比单一通道方法具有更强的一致性，且能有效提取关键信息。

2.4　冲击破坏扩展特征提取结果分析

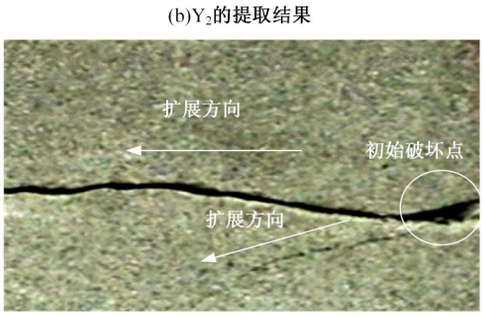
采用本文方法进行砂岩试样冲击破坏扩展特征提取，获取3个试样Y_1、Y_2、Y_3的扩展特征提取结果，如图4所示。分析图4可知：利用本文方法能够可靠地提取3个砂岩试样冲击动力破坏扩展特征，3个试样在不同冲击压力下呈现不同的扩展特征，冲击压力越大，形成的破坏裂缝相对越显著；在冲击作用下产生的裂纹向不同方向扩展。因此，本文方法能够满足砂岩冲击动力破坏扩展特征提取需求，依据提取结果可判断破坏特征的内在规律和发展趋势。



(a)Y_1的提取结果



(b)Y_2的提取结果



(c)Y_3的提取结果

图4　冲击破坏扩展特征提取结果

Fig. 4　Extraction results of extended characteristics of impact damage

3　结束语

砂岩冲击动力破坏扩展特征提取对于理解岩石的力学性能和预测工程结构的稳定性具有重要意义。本文为可靠提取砂岩冲击动力破坏扩展特征，基于Matlab软件研究了深部砂岩冲击动力破坏扩展特征提取算法，将冲击试验和Matlab软件仿真结合，保证了扩展特征提取的效果，研究成果可为分析破坏特征的内在规律和趋势提供依据。

参考文献：

[1] 金解放，王宇，方立兴，等. 水压力和轴向静应力对红砂岩冲击能量演化及破坏特性的影响[J]. 煤炭学报，2024，49(11)：4441-4455.
Jin Jie-fang，Wang Yu，Fang Li-xing，et al. Effect of water pressure and axial static stress on evolution of impact energy and damage characteristics of red sandstone[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(11)：4441-4455.

[2] 陈见行, 曾班全, 张俊文. 冲击荷载下加卸载效应对冲击性岩石力学特性的影响[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2283-2297.
Chen Jian-hang, Zeng Ban-quan, Zhang Jun-wen. Influence of loading and unloading effect on mechanical properties of impact rock under impact load[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2283-2297.

[3] 彭守建, 许庆峰, 许江, 等. 深部煤岩冲击地压多功能物理模拟试验系统研制与应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(11): 4417-4428.
Peng Shou-jian, Xu Qing-feng, Xu Jiang, et al. Multifunctional physical simulation test system for deep coal rockburst development and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4417-4428.

[4] 杨妙, 战晔, 付钰婷, 等. 高重频激光诱导击穿光谱结合卷积神经网络的岩石岩性分析研究[J]. 量子电子学报, 2024, 41(3): 553-564.
Yang Miao, Zhan Ye, Fu Yu-ting, et al. Lithology analysis of rock with high repetition frequency laser-induced breakdown spectroscopy combined with convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2024, 41(3): 553-564.

[5] 孙浩, 代宗晟, 金爱兵, 等. 基于AttentionR2U-net的岩石(体)关键节理智能识别与参数提取[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2024, 45(1): 101-110.
Sun Hao, Dai Zong-sheng, Jin Ai-bing, et al. Intelligent identification and parameter extraction of key joints in rock(mass) based on AttentionR2U-net[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024, 45(1): 101-110.

[6] 郝嘉欣, 向芳, 施紫越, 等. 基于PCAS软件对孔隙结构的定量表征——以川北地区广元千佛崖组砂岩为例[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2024, 51(3): 439-448.
Hao Jia-xin, Xiang Fang, Shi Zi-yue, et al. Quantitative characterization of pore structure based on PCAS: a case study on Qianfoya sandstone in Guangyuan, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024, 51(3): 439-448.

[7] 何学秋, 杨菲, 李振雷, 等. 砂岩破裂状态声发射梅尔倒谱系数判识方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 753-766.
He Xue-qiu, Yang Fei, Li Zhen-lei, et al. Methodology for identifying the damage state of sandstone using Mel-frequency cepstral coefficient of acoustic emission[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 753-766.

[8] 贺馨瑶, 常远, 任富强. 落锤冲击下冻结单裂隙砂岩力学及声发射特征试验研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(5): 135-141, 156.
He Xin-yao, Chang Yuan, Ren Fu-qiang. Experimental study on the mechanical and acoustic emission features of frozen single fractured sandstone under drop hammer impact[J]. Industry and Mine Automation, 2024, 50(5): 135-141, 156.

[9] 杨丽荣, 江川, 黎嘉骏, 等. 基于局部线性嵌入的特征融合方法在岩石破裂状态分类的应用[J]. 应用声学, 2023, 42(5): 971-983.
Yang Li-rong, Jiang Chuan, Li Jia-jun, et al. Application of locally linear embedding-based feature fusion method in rock fracture state classification[J]. Journal of Applied Acoustics, 2023, 42(5): 971-983.

[10] Asaka M. Sandstone detection using three-term amplitude variation with offset projection: a case study[J]. Geophysical Prospecting, 2023, 71(4): 555-566.

[11] 张蓉蓉, 沈永辉, 马冬冬, 等. 循环冲击作用下冻融红砂岩动力学特性与损伤机理[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(8): 133-148.
Zhang Rong-rong, Shen Yong-hui, Ma Dong-dong, et al. Dynamic characteristics and damage mechanism of freeze-thaw treated red sandstone under cyclic impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(8): 133-148.

[12] 杨滨, 郝景新, 刘拓宇, 等. 基于Matlab图像处理的CLT木破率测量方法[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(1): 199-204.
Yang Bin, Hao Jing-xin, Liu Tuo-yu, et al. Method of measuring wood failure percentage based on Matlab image processing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(1): 199-204.

[13] 鲁转侠, 华彩成, 冯健, 等. 基于深度卷积神经网络的频高图特征提取研究[J]. 地球物理学报, 2024, 67(9): 3290-3300.
Lu Zhuan-xia, Hua Cai-cheng, Feng Jian, et al. Research on characteristic extraction of vertical ionogram based on deep convolution neural network[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(9): 3290-3300.

[14] 赵淑欢, 葛佳琦, 梁晓林, 等. 改进加权投票的PCA-Net多特征融合SSFR[J]. 计算机仿真, 2023, 40(4):223-230.
Zhao Shu-huan, Ge Jia-qi, Liang Xiao-lin, et al. A fusion method of PCA-Net and multi-features with improved weighted voting for single-sample face recognition[J]. Computer Simulation, 2023, 40(4): 223-230.