

## 基于阈值滤波算法的气体爆破裂缝图像 识别及破岩效果评价

李泽宇,胡少斌\*

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

**摘要:** 为实现对高温高压气体爆破效果的评价并确定最佳起爆压力,设计了一种基于阈值滤波算法的裂缝识别方法。同时,提出结合熵权法与计盒维数的裂缝参数评价方法。该方法在MATLAB软件中运用阈值滤波算法识别裂缝,基于二值图获取裂缝周长、裂隙度、裂缝宽度、计盒维数等定量特征,采用熵权法确定裂缝敏感指标,结合计盒维数分析裂缝复杂程度,评价爆破效果并确定最佳起爆压力区间。使用该方法对三种不同起爆压力下的试样进行识别处理,结果表明,随着起爆压力增大,裂缝宽度涨幅从62.2%减小至47.6%;裂隙度涨幅从47.6%减小至13.2%。同时,裂缝复杂程度的增长幅度也逐渐变小,这表明爆破效能利用率逐渐降低。因此,在保证能量利用率前提下的最佳爆破效果对应的起爆压力区间为120~150 MPa。

**关键词:** 高压气体爆破;图像识别;熵权法;分形维数;爆破效能

中图分类号:U45

文献标识码:A

## Gas Explosion Crack Image Recognition and Rock Breaking Effect Evaluation Based on Threshold Filtering Algorithm

LI Zeyu, HU Shaobin\*

(School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** In order to evaluate the blasting effect of high temperature and high pressure gas and determine the optimal initiation pressure, a crack identification method based on threshold filtering algorithm was designed, along with a crack parameter evaluation method combined with entropy weight method and box dimension. In this method, MATLAB software is used to identify cracks using threshold filtering algorithm, quantitative characteristics such as crack perimeter, fracture degree, crack width, and box dimension are obtained based on binary diagrams, and the crack sensitivity index is determined by entropy weight method, and the complexity of analysis is combined with box dimension to evaluate the blasting effect and determine the optimal initiation pressure range. The results show that the growth rate of crack width decreased from 62.2% to 47.6%, and the growth rate of fracture degree decrease from 47.6% to 13.2%. Furthermore, the increase of crack complexity gradually diminished, indicating that the utilization rate of blasting efficiency gradually decreases, and the initiation pressure range corresponding to the optimal blasting effect under the premise of ensuring energy utilization is from 120 MPa to 150 MPa.

**Key words:** high pressure gas explosion; image recognition; entropy weight method; fractal dimension; blasting efficiency

收稿日期:2024-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41702289);江苏省自然科学基金资助项目(BK20201313);湖北省爆破工程重点实验室基金资助项目(HKLBEF202004)

第一作者:李泽宇(2000—),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事神经网络裂缝图像识别与评估方面的研究。

\* 通信作者:胡少斌(1990—),男,江西南昌人,博士,副教授,从事绿色智慧高温高压气体爆破相关方面的研究。

硬岩破除是地下空间施工过程中的重点环节,为此,许多新型破岩技术也应运而生<sup>[1]</sup>。作为一项新型非爆破破岩技术,高压气体致裂破岩技术<sup>[2]</sup>以其安全、环保、高效的特点而广受关注。利用破岩后形成的裂隙信息分析破岩效果,可为调整后续破岩参数、改进破岩技术以及提高经济效益提供重要参考。

裂缝图像的识别是研究裂缝特征的关键环节,现有方法分为人工测量和计算机识别两种<sup>[3]</sup>。相比于人工测量的主观性和对经验的依赖,计算机识别更为精准可靠,其主要包括基于图像处理的技术<sup>[4]</sup>和基于卷积神经网络的技术<sup>[5]</sup>。近年来,各类算法不断发展,如边缘检测、Canny 算子、阈值分割等<sup>[6-8]</sup>传统方法以及 Alexnet、ResNet、Mask R-CNN、YOLO 网络等<sup>[9-12]</sup>深度学习模型。裂缝特征提取方面,常用方法包括用 Zhang-Suen 细化算法<sup>[13]</sup>提取长度,用最短距离法<sup>[14]</sup>提取宽度,以及基于像素比例计算裂缝面积,基于小波变换多尺度理论确定步长<sup>[15]</sup>等。对裂缝的评价则多采用裂隙率<sup>[16]</sup>、量评与质评法<sup>[17]</sup>等方式,且上述裂缝特征提取与评价方法多用于道路路面与地震裂缝<sup>[18]</sup>,其在硬岩破除领域的适用性尚待验证,尤其是裂缝特征参数与破岩参数(如起爆压力)之间的定量关联分析仍较为薄弱。

针对上述问题,本研究以表面均匀的水泥立方体试块为对象,利用图像处理技术对裂缝图像进行预处理,通过阈值滤波算法获取二值化图像,并结合 MATLAB 提取裂缝周长、平均宽度、计盒维数等定量特征。在此基础上,构建裂缝特征评价指标体系,结合数学分析方法定量评估破岩效果,探索最佳起爆压力。通过这一方法为高压气体致裂破岩技术提供了科学优化依据,且探索了裂缝特征与破岩效果之间的内在联系,为硬岩破除技术的改进与推广提供了理论支持。

## 1 致裂试验

### 1.1 试验原理

为模拟无地应力荷载条件下的浅部岩层开发场景,试验采用高温高压空气对岩体进行致裂,主要的致裂作用来自气爆荷载。将气爆产生的应力波作用于岩石上,使其出现裂缝。试验需要在岩体表面钻一圆柱形孔,气爆荷载产生的应力波作用于岩体的圆柱形空腔内表面,使其瞬间受到径向动荷载的弹性波作用,内径向压应力在极短时

间内达到峰值,岩体受到径向拉伸破坏,以圆柱形空腔为中心产生径向裂缝;应力波消散后,压应力卸载导致岩体回弹,产生径向拉应力以及环向拉应力,岩体产生环向破坏,形成环向裂缝。

### 1.2 试验装置

高温高压空气冲击破岩试验装置主要由高压发生系统、真三轴加载系统和数据监测系统组成。高压发生系统主要包括高温高压反应釜和高压空压机,高压空压机在短时间内向高温高压反应釜中注入 30~40 MPa 的压缩空气,压缩空气在吸收反应物产生的热量后瞬时增压至 100 MPa 以上;真三轴加载系统由三个方向的油缸及加载板组成,油缸通过液压泵提供压力;数据监测系统包括高频高压压力传感器、应变片和高频采集仪等。

### 1.3 试样条件

天然岩石具有强非均质性和各向异性,这易使试验结果具有随机性,且将其制备成规则试块难度较大,故选用高强度水泥制成 200 mm×200 mm×200 mm 的立方体试样来模拟天然岩石。水泥中不添加骨料,可视为各向同性,其理论单轴抗压强度可达到 100 MPa,适用于模拟露天开采无地应力的高强度岩石。在水泥试样单面钻一个直径为 50 mm、深度为 100 mm 圆柱形孔,孔内放入一根直径略小的不锈钢管,用于传导高温高压气体。钢管末端正处于试样中心处,并留有气孔,以使试样六个方向受到相同的冲击力。为减少孔尺寸对试验结果的影响,采用真三轴装置的加载板对试样周围施加限制但不施加围压。不锈钢管开口处设有螺纹,与外接管道相连。钢管与水泥块孔壁间使用环氧树脂结构胶进行填充并密封。试样及开孔的示意图如图 1 所示。

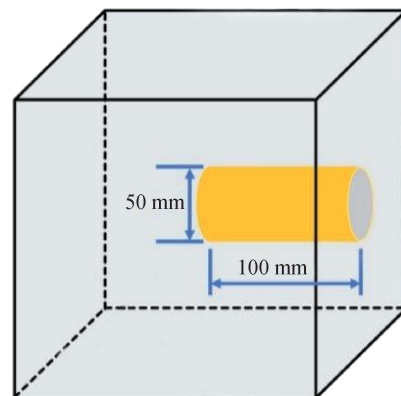


图 1 试样及开孔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the specimen and opening

## 1.4 试验步骤

试样准备完成后,将有钻孔的一面朝外,把试样装入真三轴加载系统中,按照下列步骤进行试验:(1)将加载板紧贴试样,并连接好管道以及高压发生系统;(2)使用高压空压机向高温高压反应釜中注入空气以进行首次增压,整个过程中通过压力监测系统实时监测反应釜中的压力变化情况;(3)第一次增压完毕后,通过电激发反应釜中的生物质能材料燃烧放热,进行第二次加压,当压力达到预设值时,压力传感器传递信号给电磁阀进行泄压致裂;(4)致裂完成后,拍照记录试样表面裂缝分布情况。

本试验一共进行三组,三组试样的起爆压力分别为 90、120 和 150 MPa。破岩完成后,分别记录三组试块六个面的裂缝分布情况。

## 2 裂缝图像识别系统

### 2.1 图像获取

高压气体爆破试验完成后,使用摄像机获取立方体水泥试样六个面的裂缝图像,拍摄过程中需确保光线充足且均匀,以减少拍摄因素对后续图像处理造成的干扰。拍摄图像大小为  $820 \times 820$  像素,立方体水泥试样图像示例见图 2。



图 2 立方体水泥试样表面裂缝图像

Fig. 2 Cracks on the surface of cement specimens

为便于后续研究,将有炮孔的一面称为主爆破面,周围四个面为侧爆破面,与主爆破面对称的面称为后爆破面。接下来编写 MATLAB 程序建立裂缝图像识别系统,对获取的裂缝图像进行预处理和裂缝识别操作。

### 2.2 图像预处理

拍照获取 RGB 彩色图像后,需对其进行预处

理才能进行后续的裂缝识别,步骤如下:(1)灰度化处理:将彩色图像转变为灰度图像;(2)直方图均衡化处理:采用 MATLAB 中的“histeq”函数对灰度图像进行处理,提高图像的对比度和亮度,以降低噪声对裂缝部分的干扰;(3)中值滤波操作:采用 MATLAB 中的“medfilt2”函数对灰度图像进行二维中值滤波,达到减弱噪声和平滑图像的效果;(4)伽马值校正:对灰度图像进行伽马值校正,增加其亮度和对比度,改善图片的可视效果,进一步减弱噪声干扰。

按照上述步骤编写裂缝识别程序对图像进行预处理,原图与图像预处理后的对比结果如图 3 所示。

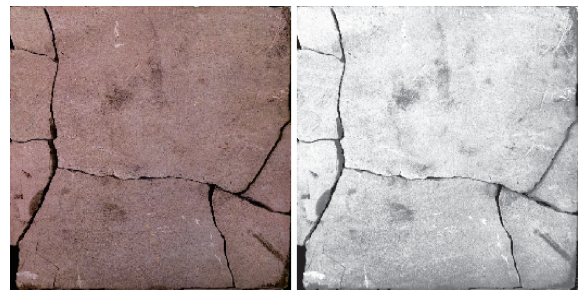


图 3 原图像与预处理图像对比图

Fig. 3 Comparison chart of the original with the preprocessed

### 2.3 裂缝识别

首先将灰度图像二值化,然后通过滤波处理保留连通区域消除噪声。将处理后的图像与灰度图像纳入计算,用包围框遍历每个区域,根据不同区域内像素的平均灰度值与包围框内像素平均灰度值的差异判别裂缝是否存在。其涉及的数学计算式如下:

$$\text{Sub}(k) = |\text{Av1}(k) - \text{Av2}(k)| \quad (1)$$

式中, $\text{Av1}(k)$ 是包围框内像素平均灰度值,用下面的式子确定: $\text{Av1}(k) = \frac{\text{RectArea}(k)}{\text{sum1}(k)}$ ;  $\text{Av2}(k)$ 是区域内像素平均值,用下式确定: $\text{Av2}(k) = \frac{\text{sum2}(k)}{\text{Ln}(k)}$ ;当差值 Sub 的值小于阈值的时候,则判定为没有裂缝,反之即裂缝存在。根据多次试验选取的最佳裂缝识别效果,在本代码识别过程中,将该阈值设置为 10。

按照上述步骤编写裂缝识别程序,对图 3 中预处理图像进行裂缝识别,识别结果如图 4 所示。

使用 PS 软件人为标定裂缝并计算其包含的像素点个数,并与裂缝识别图中白色像素点个数进行对比,二者误差小于 3%时,说明识别效果较



图4 裂缝识别图

Fig. 4 Crack identification diagram

好。最后计算连通区域的一系列属性和参数,包括裂缝条数、裂缝方向、交点数量、中心坐标、偏心率等参数,用于后续的裂缝评估。

使用上述裂缝图像识别系统对三个试样的图像进行识别,分别获取其六个面的裂缝识别图像。三个试样共六个面的裂缝识别图如图5—图7所示。

### 3 裂缝参数分析系统

通过裂缝识别成功获取含有裂缝数据的二值图像,其中白色为裂缝;黑色为背景。接下来分析二值图像,以评估爆破的效果。

### 3.1 裂缝图像参数指标

#### 3.1.1 裂缝周长

编写程序读取图像中裂缝信息,采用 Sobel 算子进行边缘检测提取裂缝轮廓,计算各部分轮廓周长,其总和即为裂缝整体周长。然后根据试样的实际尺寸将其转换为实际长度。其计算如下:

$$P = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} + \sqrt{(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2} \quad (2)$$

式中:  $P$  为图像中裂缝部分的总长度, cm;  $\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$  表示相邻两点之间的欧几里得距离;  $\sqrt{(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2}$  是为了闭合轮廓,将轮廓的最后一个点和第一个点连接起来。

#### 3.1.2 裂缝平均宽度

裂缝宽度是指裂缝两侧之间的距离或张开程度,通常用来描述裂隙或缝隙的宽度。它可以通过测量裂缝的两侧边缘之间的最短距离来表示。

本文计算裂缝平均宽度使用了边缘检测与膨胀算法。先使用 Sobel 算子检测图像的边缘,然后设置一个线性结构元素,接着利用膨胀操作 (MATLAB 中的 `imdilate` 函数) 来填充裂缝,以此得到裂缝图像的中心线。接下来沿着列方向对膨胀后的

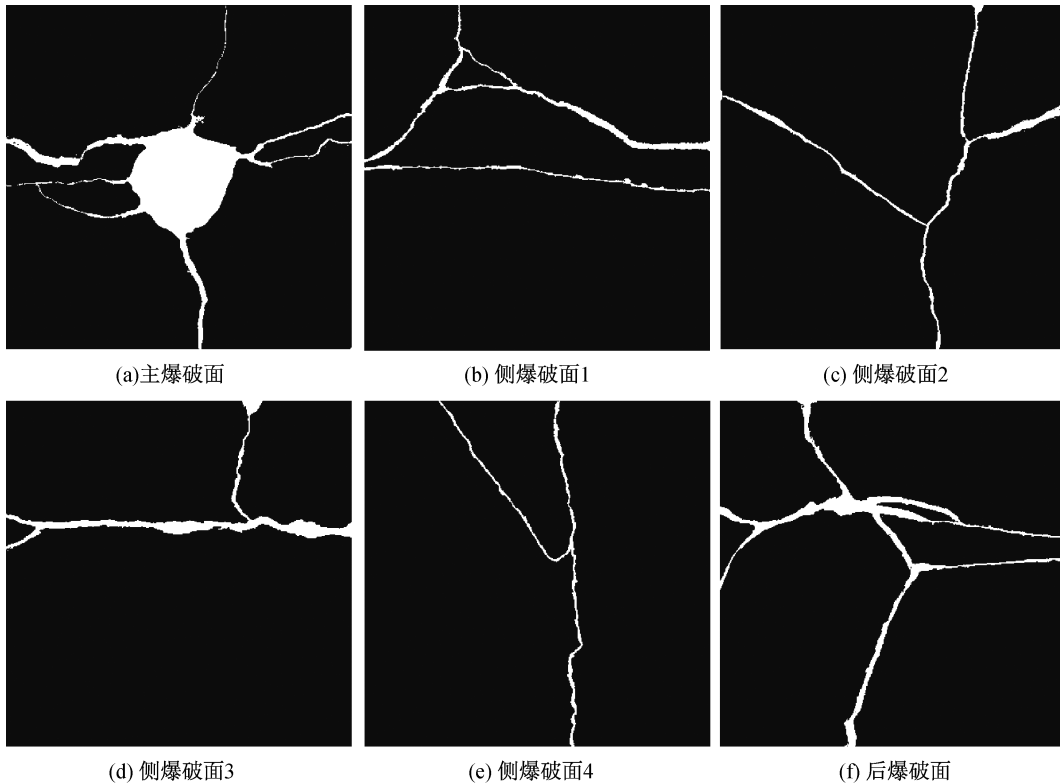


图5 一号试样裂缝识别图

Fig. 5 Crack identification diagram of specimen No. 1

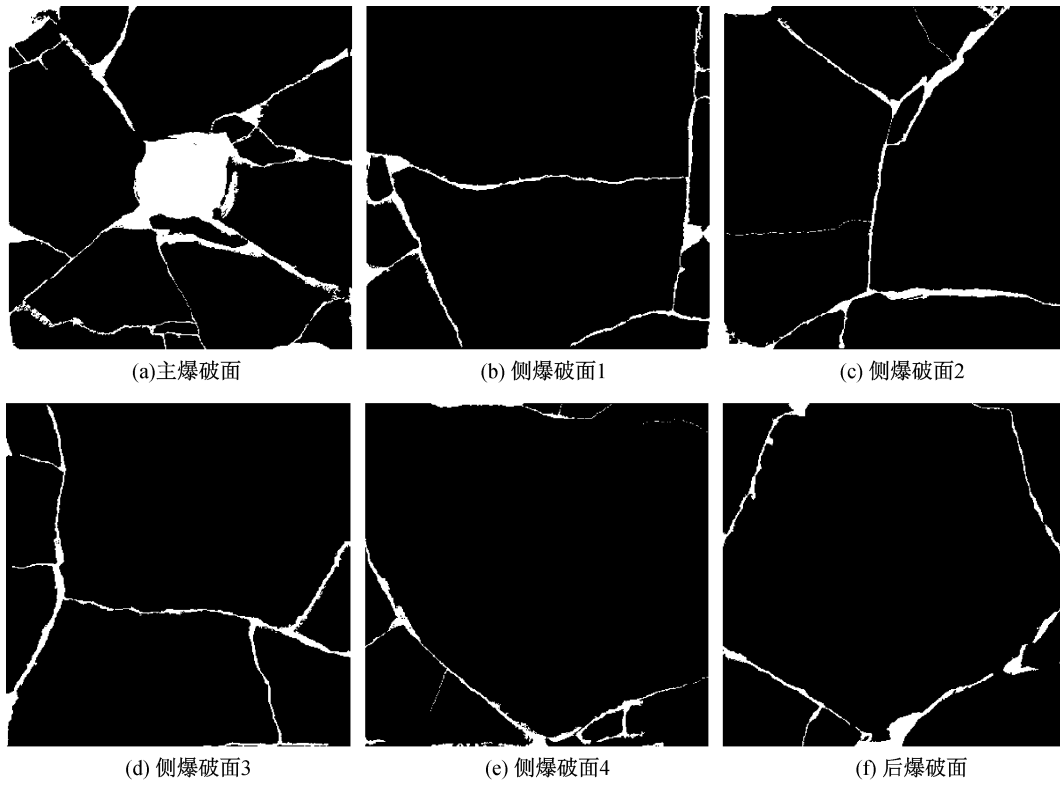


图 6 二号试样裂缝识别图

Fig. 6 Crack identification diagram of specimen No. 2

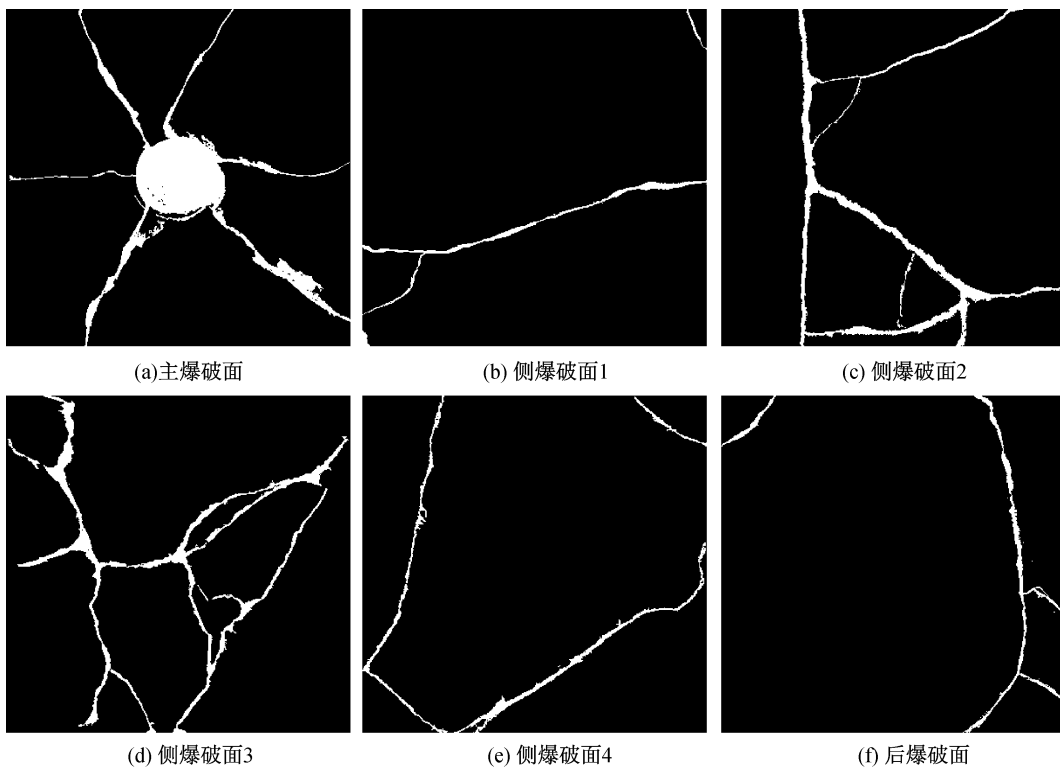


图 7 三号试样裂缝识别图

Fig. 7 Crack identification diagram of specimen No. 3

图像进行求和操作,即可得到每一行中白色像素的数量,从而可以计算得到裂缝的宽度信息。最

后根据试样的实际尺寸将裂缝宽度信息从像素转换为实际长度即可。

其计算公式如下:

$$\omega_i = \sum_{j=1}^n \text{dilatedEdge}(i,j) \quad (3)$$

式中:  $\omega_i$  表示第  $i$  行的裂缝宽度, cm;  $n$  是图像的列数;  $\sum_{j=1}^n \text{dilatedEdge}(i,j)$  是经过膨胀的边缘图像在位置  $(i,j)$  处的像素值。各行裂缝宽度保存在一个向量中, 该向量表示为  $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$ ,  $m$  为图像的行数。

计算平均宽度时, 只需对上述向量中保存的裂缝宽度信息求平均数即可。

### 3.1.3 裂隙度

对于每张处理过后的图像, 以像素点为单位, 统计其图像中的裂隙总面积与截面总面积, 计算二者的比值, 作为每张裂隙图像的裂隙度。

其计算公式为

$$r_i = \frac{S_{li}}{S_i} \quad (4)$$

式中:  $S_{li}$  为图像的裂隙总面积;  $S_i$  为图像的总面积;  $r_i$  为图像的裂隙度。

### 3.2 计盒维数

计盒维数是用于度量分形对象的复杂程度的指标, 使用计盒维数可以描述裂缝图像的复杂程度和分形特征。计盒维数越高, 裂缝的分形结构越复杂, 从某种程度上可以反映爆破效果更佳。计盒维数具体计算步骤如下: 首先选取一组不同边长的正方形盒子 (box), 记其边长为  $r$ 。对于每个

尺度  $r$ , 将研究区域划分为若干边长为  $r$  的网格单元, 统计至少包含一个前景像素 (即像素值为 1 的裂缝区域) 的网格单元数量  $N_r$ 。通过系统改变  $r$  的取值, 获得相应的  $N_r$  数据集。

$$N_r = \sum_{\text{boxes}} \text{any}(\text{sub\_image}(\cdot)) \quad (5)$$

然后对盒数目  $N_r$  和盒子尺寸  $r$  进行对数变换, 再拟合对数变换后的数据进行线性回归, 可得计盒维数为

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log(N_r)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (6)$$

编写程序计算三块试样六个面的裂缝参数指标, 包括裂缝条数、交点个数、裂缝周长、裂缝均宽、裂隙度、计盒维数, 综合数据如表 1—表 3 所示。

需要注意的是, 由于主爆破面的致裂孔对参数数据影响较大, 后续分析中不对主爆破面数据做过多讨论。

## 4 分析评价

本文采用了 6 个指标来描述和评估致裂效果, 分别为裂缝条数、交点个数、裂缝周长、裂缝均宽、裂隙度、计盒维数, 这些指标均能一定程度上反映破裂面的裂缝复杂程度, 但其重要程度有所不同。下面采用数学方法对这些指标进行分析。

### 4.1 熵权法

本文通过熵权法确定不同指标在裂缝评价中

表 1 一号试样六个爆破面裂缝参数信息

Tab. 1 Parameter information of six blast faces of sample No. 1

爆破面	裂缝条数	交点个数	裂缝周长/cm	裂缝均宽/cm	裂隙度/%	计盒维数
主爆破面	6	6	259.9	0.82	9.17	1.555 2
侧爆破面 1	3	3	229.7	0.57	2.41	1.341 5
侧爆破面 2	3	2	184.1	0.71	1.96	1.25 6
侧爆破面 3	2	2	132.3	0.36	2.81	1.353 1
侧爆破面 4	2	1	146.8	0.65	1.24	1.249 3
后爆破面	4	2	260.6	0.85	4.31	1.411 1

表 2 二号试样六个爆破面裂缝参数信息

Tab. 2 Parameter information of six blast faces of sample No. 2

爆破面	裂缝条数	交点个数	裂缝周长/cm	裂缝均宽/cm	裂隙度/%	计盒维数
主爆破面	5	4	558.5	1.69	12.52	1.693 1
侧爆破面 1	4	3	306.3	1.01	3.3	1.535 3
侧爆破面 2	4	2	313.2	0.99	3.86	1.443 6
侧爆破面 3	3	2	276.9	0.97	3.17	1.457 6
侧爆破面 4	2	1	244.7	0.74	2.25	1.344 3
后爆破面	4	1	226.8	0.83	2.84	1.385 2

表3 三号试样六个爆破面裂缝参数信息

Tab. 3 Parameter information of six blast faces of sample No. 3

爆破面	裂缝条数	交点个数	裂缝周长/cm	裂缝均宽/cm	裂隙度/%	计盒维数
主爆破面	6	6	329.8	1.25	8.47	1.535 6
侧爆破面 1	2	1	129.9	0.35	2.04	1.379 7
侧爆破面 2	4	4	329.7	1.27	4.81	1.460 6
侧爆破面 3	4	3	395.6	1.64	5.22	1.527 4
侧爆破面 4	3	2	237.8	0.92	2.27	1.351 4
后爆破面	4	1	226.8	0.83	2.84	1.385 2

的敏感程度,通过衡量各指标的变异程度来确定其在综合评价中的权重大小,以此通过敏感指标确定最佳起爆压力。熵权法的主要步骤如下:

#### (1) 数据标准化

首先对各个指标进行去量纲化处理,假设给定了  $m$  个指标,每个指标有  $n$  组数据:

$$X_1, X_2, X_3, \dots, X_m \quad (7)$$

其中:

$$X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (8)$$

假设对于各指标数据标准化之后的值为

$$Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m \quad (9)$$

则有:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (\text{正向指标}) \quad (10)$$

$$Y_{ji} = \frac{\min(X_i) - X_{ij}}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (\text{负向指标}) \quad (11)$$

#### (2) 各指标均值

假设某一级指标下存在  $m$  个二级指标,且有  $n$  组数据,记为矩阵  $Y_{ij}$ 。在同一指标下,各组数据占全部数据的比重  $p_{ij}$  为

$$p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

#### (3) 各指标信息熵

信息熵是事件所包含的信息量的期望,一组数据的信息熵为

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (13)$$

在式(4)一式(7)中,  $p_{ij} = 0$  时定义  $E_j$  为 0。

#### (4) 各指标权重

各指标的权重  $\omega_j$  为

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{m - \sum_{j=1}^m E_j} \quad (14)$$

#### (5) 各指标评价

由于主爆破面、后爆破面与侧爆破面相比,在破岩过程中的受力条件差异较大,故在三块试样

共 18 组数据中,选取每块试样受力情况近似的四个侧爆破面,共 12 组数据,采用上述方法进行各指标权重计算,裂缝条数、交点个数、裂缝周长、裂缝均宽、裂隙度、计盒维数六项指标的权重  $\omega_j$  分别为:0.113 5, 0.313 4, 0.146 8, 0.221 9, 0.198 9, 0.055 4。可得出权重占比较重的三项指标为:交点个数、裂缝均宽和裂隙度,说明这三项指标的变化对于评价裂缝来说更为敏感。

## 4.2 裂缝参数分析

### 4.2.1 裂缝交点个数

结合表 1—表 3 中裂缝交点数量对破岩效果进行分析,一、二号试样的各爆破面裂缝交点个数整体较少,且数量差异不大。三号试样的各爆破面裂缝交点数量较多,但差异略大,存在裂缝交点数量较多的是侧爆破面 2 与侧爆破面 3。

### 4.2.2 裂缝均宽、裂隙度

对于三块试样的侧爆破面,计算平均裂缝宽度和裂隙度的平均值,以评估不同起爆压力下该两项指标的变化情况。

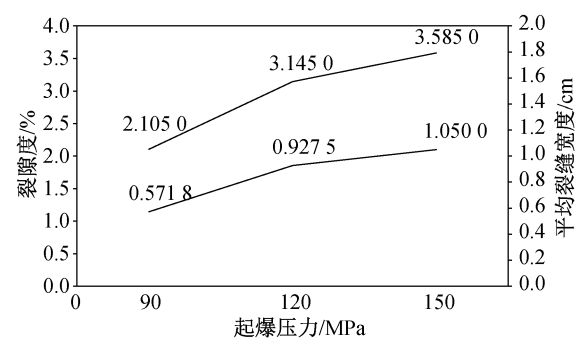


图8 不同起爆压力下试样裂隙度与裂缝平均宽度

Fig. 8 Gap degree and crack width under different pressures

由图 8 可以看出,起爆压力越大,平均裂缝宽度和裂隙度越大。但随着起爆压力不断上升,平均裂缝宽度和裂隙度的增长幅度逐渐减小。二号试样平均裂缝宽度比一号试样约 62.2%,裂隙度提升 47.6%;三号试样相比二号试样平均裂缝宽度提升 13.9%,裂隙度提升 13.2%。

分析表1—表3中侧爆破面数据可得,一号试样的裂缝宽度在0.8 cm以下,裂隙度小于3%,二号试样的裂缝宽度在1 cm左右,裂隙度大于3%。一、二号两块试样侧爆破面的裂缝宽度和裂隙度数值较均衡,而三号试样存在裂缝宽度和裂隙度明显偏大的2、3两侧爆破面,平均裂缝宽度大于1.2 cm,且裂隙度约为5%。

#### 4.3 计盒维数评价

计盒维数相较于其他裂缝指标有其独特意义,不同于其他裂缝指标反映裂缝的长度、大小等基本物理信息,计盒维数可以反映裂缝结构的复杂程度,其作用不可替代。

结合表1—表3中数据,一号试样的计盒维数数值在1.2~1.4之间,二号试样的计盒维数介于1.3~1.5之间,三号试样的计盒维数介于1.35~1.55之间。一号试样的裂缝复杂程度较低,二号试样较一号试样复杂程度提高约7%~8%,三号试样较二号试样复杂程度仅提高1%,该结果表明,起爆压力从90 MPa升高到120 MPa的过程中,裂缝复杂程度有显著提升,但在起爆压力从120 MPa升高到150 MPa后,裂缝复杂程度的变化并不明显,说明裂缝复杂程度随起爆压力的升高而提高,但其复杂程度存在上限,在达到某一特定起爆压力后,裂缝复杂程度基本不再变化。

#### 4.4 爆破效果评价

经过上述分析,结合具体数据,一号试样的侧爆破面裂缝参数较小且接近,其爆破能量向各个面扩散基本相同,裂缝以炮孔为中心向周围发育,表明其冲击能量多作用于产生裂缝而未将裂缝扩大,破裂情况不够理想。二号试样裂缝数量较多,破裂程度较一号试样更为明显,爆破效果更好。三号试样拥有最大的平均裂缝宽度和裂隙度,整体上来看破裂程度更高,裂缝扩展得更充分,但其侧爆破面2和侧爆破面3指标明显偏大,爆破产生的冲击能量更多向这两个爆破面作用,部分爆破能向这两个爆破面泄出,能量利用率不够高。

综上所述,随着起爆压力的增大,作用于硬岩的爆破效果也不断提升,但起爆压力在120 MPa之后,裂缝指标增长率在逐渐变小,反映出爆破能的利用率在变低。在起爆压力达到150 MPa时试样已完全致裂,部分爆破冲击力从裂缝中溢出,虽然爆破效果最好,但其能量利用率较低。继续进行多次试验,采用上述方法即可确定保证在能量

利用率的前提下,最佳爆破效果对应的最佳起爆压力,该压力应位于120 MPa与150 MPa之间。

## 5 结论

1) MATLAB 阈值滤波算法能够清晰准确识别水泥试块表面裂缝图像。该方法能够成功去除噪声干扰,简便快捷,运行速度快,且有效减少了人为因素带来的误差,为后续的裂缝特征提取和定量分析提供了可靠的图像数据。

2) 熵权法能够确定不同裂缝参数指标在综合评价中所占的权重,裂缝交点个数、平均裂缝宽度和裂隙度所占权重高,为敏感指标,计盒维数能够反映裂缝复杂程度,使用该方法可以对硬岩破除实验的爆破效果进行定量评估。

3) 起爆压力从90 MPa增长到120 MPa后,平均裂缝的宽度、裂隙度和复杂程度显著提高,分别增加62.2%、47.6%和7%~8%;而从120 MPa增长到150 MPa时,裂缝参数增长幅度明显变缓,平均裂缝宽度仅增加13.9%,裂隙度增加13.2%。这表明随着起爆压力进一步增大,裂缝参数增长趋势放缓。综合分析表明,150 MPa的爆破效能利用率较120 MPa有所降低。为确保经济效益,达到最佳爆破效果的起爆压力应介于120 MPa与150 MPa之间,进一步设置不同起爆压力进行试验,即可精准确定起爆压力数值。

#### 参考文献:

- [1] 王少锋,孙立成,周子龙,等.非爆破岩理论和技术发展与展望[J].中国有色金属学报,2022,32(12):3883-3912.  
WANG S F, SUN L C, ZHOU Z L, et al. Development and prospect of non-blasting rock breakage theory and technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3883-3912.
- [2] 周盛涛,罗学东,蒋楠,等.二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J].工程科学学报,2021,43(7):883-893.  
ZHOU S T, LUO X D, JIANG N, et al. A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 883-893.
- [3] 刘宇飞,樊健生,聂建国,等.结构表面裂缝数字图像法识别研究综述与前景展望[J].土木工程学报,2021,54(6):79-98.  
LIU Y F, FAN J S, NIE J G, et al. Review and prospect of digital-image-based crack detection of structure surface [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(6): 79-98.

- [4] 李文静,白静,彭斌,等.图卷积神经网络及其在图像识别领域的应用综述[J].计算机工程与应用,2023,59(22):15-35.  
LI W J, BAI J, PENG B, et al. Graph convolutional neural network and its application in image recognition [J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59 (22):15-35.
- [5] 张松兰.基于卷积神经网络的图像识别综述[J].西安航空学院学报,2023,41(1):74-81.  
ZHANG S L. A review of image recognition based on convolutional neural network[J]. Journal of Xihang University, 2023,41(1):74-81.
- [6] 张士萍,刘加平.边缘检测算子及其在裂缝图像中的应用[J].混凝土,2010(6):25-27.  
ZHANG S P, LIU J P. Edge detection operators and their application in cracking image [J]. Concrete, 2010(6):25-27.
- [7] 孙亮,邢建春,谢立强,等.基于自适应阈值 Canny 算法的裂缝检测方法研究[J].网络安全与数据治理,2017,36(5):35-37+41.  
SUN L, XING J C, XIE L Q, et al. An adaptive threshold-based Canny algorithm for crack detection [J]. Cyber Security and Data Governance, 2017,36(5):35-37+41.
- [8] 彭博,蒋阳升,韩世凡,等.路面裂缝图像自动识别算法综述[J].公路交通科技,2014,31(7):19-25.  
PENG B, JIANG Y S, HAN S F, et al. Pavement crack image automatic recognition algorithm: a review [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2014,31(7):19-25.
- [9] 沙爱民,童峥,高杰.基于卷积神经网络的路表病害识别与测量[J].中国公路学报,2018,31(1):1-10.  
SHA A M, TONG Z, GAO J. Recognition and measurement of pavement disasters based on convolutional neural networks [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018,31(1):1-10.
- [10] 梁栋,李英俊,张少杰.融合改进 ResNet-14 和 RS-Unet 模型的混凝土桥梁裂缝识别[J].北京交通大学学报,2023,47(3):10-18.  
LIANG D, LI Y J, ZHANG S J. Identification of cracks in concrete bridges through fusing improved ResNet-14 and RS-Unet models [J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2023,47(3):10-18.
- [11] 刘青松,文旭光,罗文彬,等.一种基于 MASK R-CNN 的铁路隧道裂缝识别方法[J].科学技术创新,2023(3):5-9.  
LIU Q S, WEN X G, LUO W B, et al. A method of crack identification in railway tunnel based on MASK R-CNN [J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(3):5-9.
- [12] 王莉静,孙泽然,李志猛,等.改进 YOLOv5 的沥青路面裂缝检测方法[J].河北工程大学学报(自然科学版),2024,41(3):67-73+79.  
WANG L J, SUN Z R, LI Z M, et al. Asphalt pavement crack detection method based on improved YOLOv5 [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2024,41(3):67-73+79.
- [13] 许守春,许向阳,冯宇恒.基于图像处理的裂缝量化分析[J].化工自动化及仪表,2024,51(2):173-180+337.  
XU S C, XU X Y, FENG Y H. Quantitative analysis of cracks based on image processing [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2024, 51 (2): 173-180 +337.
- [14] 房铭坤,付国.基于数字图像处理的混凝土裂缝宽度检测方法研究[J].建筑结构,2019,49(S2):630-634.  
FANG M K, FU G. Research on crack width detection method of concrete based on digital image processing [J]. Building Structure, 2019,49(S2):630-634.
- [15] 李丽宏,谢东阳,王琳,等.纹理图像多尺度灰度共生矩阵步长参数的研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2021,38(3):108-112.  
LI L H, XIE D Y, WANG L, et al. Research on step parameter of multi-scale gray level co-occurrence matrix for texture image [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2021, 38 (3): 108-112.
- [16] 关宝树.隧道施工的技术特性、理念及其发展(上)[J].铁道建筑技术,2003(3):1-6.  
GUAN B S. Technical character idea of tunnel construction and its development [J]. Railway Construction Technology, 2003(3):1-6.
- [17] 杜承泽.基于深度学习的裂缝识别及定量评价研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2021.  
DU C Z. Research on fault recognition and quantitative evaluation based on deep learning [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.
- [18] 白明洲,许兆义,王连俊,等.隧道围岩分级的模糊信息分析模型及应用研究[J].铁道学报,2001(6):85-88.  
BAI M Z, XU Z Y, WANG L J, et al. Study and application on fuzzy information analysis model in tunnel surrounding rockmass classification [J]. Journal of the China Railway Society, 2001(6):85-88.

(责任编辑 周雪梅)