



移动扫码阅读

王泰华,董 征,刘加奇,等.基于手机图像处理的煤炭 GSI 检测系统设计与实现[J].煤炭科学技术,2021,49(3):154-159. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.03.021

WANG Taihua, DONG Zheng, LIU Jiaqi, et al. Design and complete of coal GSI detection system based on mobile image processing[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(3): 154-159. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.03.021

基于手机图像处理的煤炭 GSI 检测系统设计与实现

王泰华¹,董 征¹,刘加奇¹,郭红玉²

(1.河南理工大学 电气工程与自动化学院,河南 焦作 454000;2 河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000)

摘 要:煤炭地质强度因子(GSI)是煤矿工程中一个重要参数,反映了煤体强度的稳定性。使用 Android Studio 软件开发设计了基于 Android 手机平台的煤炭地质强度因子(GSI)检测系统,将煤炭样本制成相应规格的煤心后,通过手机拍照或相册获取煤炭图片,然后对其进行图像处理得到煤炭裂隙图,再根据分形维数对煤炭裂隙图进行处理即可计算出 GSI 数值,并能即时显示检测结果。利用 Java 语言和 OpenCV 计算机视觉库在 Android 手机上实现煤炭 GSI 图像处理与检测。结果表明:通过该系统获得的 GSI 数值与实际数值具有线性拟合关系且误差较小,检测时间小于 5 s,大幅缩短了 GSI 数值确定的时间,减少传统人工测定产生的差异,对煤矿勘探和开采具有一定的实际应用价值。

关键词:地质强度因子(GSI);Android 手机;图像处理;分形维数

中图分类号:TD679

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)03-0154-06

Design and complete of coal GSI detection system based on mobile image processing

WANG Taihua¹, DONG Zheng¹, LIU Jiaqi¹, GUO Hongyu²

(1. Institute of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Energy Science and safe Engineering, Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Coal geological strength index (GSI) is an important parameter in coal mine engineering, which reflects the stability of coal strength. This paper uses Android Studio software to develop and design a coal geological strength index (GSI) detection system based on Android mobile platform. After the coal sample is made into the coal core of the corresponding specification, the coal pictures are taken by mobile phone or photo album, and then the coal fracture image is obtained after image processing, and then the GSI value can be calculated by processing the coal fracture image according to the fractal dimension, and the detection results can be displayed in real time. Using Java language and OpenCV computer vision library to realize coal GSI image processing and detection on Android mobile phone. The results show that the GSI value obtained by the system has a linear fitting relationship with the actual value, and the error is small, the detection time is less than 5 seconds, which greatly shortens the time of GSI value determination, reduces the difference of traditional manual measurement, and has a certain practical application value for coal exploration and mining.

Key words: geological strength index(GSI); Android mobile phone; image processing; fractal dimension

0 引 言

地质强度因子(GSI)是由 Hoek、Brown 在 1995 年提出的一种量化岩体强度的指标,可以有效地反映岩体的稳定性^[1-3]。地质强度因子量化范围为

0~100,值越大表明岩体越稳定、强度越高。为方便研究煤炭岩体构造,一些工程技术人员将地质强度因子(GSI)引入煤体结构参数中,将煤炭根据 GSI 分为原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤与糜棱煤 4 大种类^[4],为煤矿开采、瓦斯抽取等煤炭工程提供 1 个重

收稿日期:2021-01-20;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974326);首都科技领军人才资助项目(Z18110006318021)

作者简介:王泰华(1976—),男,河南焦作人,硕士生导师,副教授。E-mail:9567551@qq.com

通讯作者:董 征(1994—),男,河南焦作人,硕士研究生。E-mail:460757110@qq.com

要的数据指标,通过煤炭地质强度因子 GSI 来判定煤炭的稳定性,以此确定煤矿开采与瓦斯抽取等工程的可行性^[5]。

随着智能手机的普及,越来越多的用户参与到 Android 手机的体验之中。Android 手机强大的功能使得其应用于各个方面并取得了良好的效果。对于工业工程领域,Android 手机相比于 PC 机具有成本低、易操作、便捷性强、不依赖环境等显著优势,且使用人群基数大,更新换代快,因此在未来工业控制领域会有更加广阔的应用前景。

传统的煤炭地质强度因子检测方法需要人工对照煤炭地质强度因子分类表来取值,操作繁琐且费时费力,取值全靠研究人员主观经验,没有统一量化标准。在此背景下,提出了 1 种基于 Android 手机平台的煤炭地质强度因子(GSI)检测系统,根据煤炭裂隙来判定煤炭地质强度因子,煤炭裂隙越多 GSI 越低,煤炭裂隙越少 GSI 越高。通过手机相机获取煤炭图片后进行一系列图像处理技术,依据分形维数算出地质强度因子(GSI)并及时显示出来。经研究发现,基于手机图像处理获取的煤炭地质强度因子(GSI)相较于传统煤炭地质强度因子检测方法更加便捷快速高效,有很强的创新性和应用价值^[6-7]。

1 岩体参数 GSI 估算方法

1.1 Hoek-Brown 强度准则

Hoek 和 Brown 通过对大量岩石数据分析,得出了岩体强度与极限主应力之间的关系,被称为 Hoek-Brown 准则,其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为岩体最大主应力、最小主应力; σ_c 为岩体抗压强度; m_b 、 s 、 α 为岩体的 Hoek-Brown 常量^[9-10]。

1.2 基于 GSI 的岩体参数估算方法

为了估算 Hoek-Brown 准则的 m_b 、 s 、 α 三个常量,建立了地质强度因子(GSI)作为一种新的岩体参数来对岩体结构进行描述,其表达式为

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{I_{GS}}{28} - \frac{100}{D}\right) \quad (2)$$

$$s = \exp\left(\frac{I_{GS}}{28} - \frac{100}{3D}\right) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{I_{GS}}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (4)$$

式中: I_{GS} 为地质强度因子(GIS)的值; D 为岩体扰动因子, $D \in (0, 1)$,无扰动取值为 0,半扰动取值为

0.5,全扰动取值为 1; m_i 为岩体霍克布朗常数,可以通过查表获得^[10-11]。

岩体弹性模量 E_m 的表达式为

$$E_m = 10^{\frac{I_{GS}-10}{40}} \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \quad (5)$$

1.3 基于 GSI 的煤体结构表征

为了更好的研究煤炭结构,一些学者将 Hoek-Brown 准则引入煤体结构参数中,通过对地质强度因子(GSI)的估算以及煤体裂隙情况,将原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤、糜棱煤等 4 大类煤体根据裂隙与风化程度定量表示 GSI 见表 1^[12]。

表 1 煤体结构量化的地质强度因子

Table 1 Geological intensity factor of coal structure quantification

构造	不同表面条件下的地质强度因子 I_{GS}				
	A	B	C	D	E
I 类 	90			此范围内不适用	此范围内不适用
I 类 	80				
II 类 	70	60			
II 类 		50			
III 类 			40	30	
III 类 				20	10
IV 类 					
IV 类 	此范围内不适用	此范围内不适用			

注:A—非常好:结构面极其粗糙,裂隙宽度极小,肉眼无法识别;B—好:结构面粗糙,裂隙宽度肉眼易识别,结构面有铁钙;C—一般:结构面较平整,部分出现平滑面,有蚀变现象,裂隙达毫米;D—差:结构面相互交织,有镜面擦痕,裂隙连通性差,有棱角状碎砾充填;E—极差:结构镜面发育,已忧粉状,无法识别结构面无真正意义上的裂隙;I类—原生结构煤:完整块状,层状、似层状构造原生条带状清晰,煤壁观测大范围内分布极少裂隙,内、外生裂隙均可辨认,未见揉皱镜面,块体间无相对位移,煤体硬度大;II类—碎裂煤:层状、似层状透镜体,条带状断续可见,块体间已有相对错动,煤壁观测大范围内煤体被多组互相交切的裂隙切割,未见揉皱镜面,煤体硬度较大;III类—碎粒煤:煤层变形呈透镜状,层理混乱,煤壁观测有镜面擦痕及片状构造,次生节理密庆大,构造镜面发育,节理已无法识别,易捻搓成碎粒状,煤体硬度较低;IV类—糜棱煤:煤体呈鳞片状、透镜状及土状构造,似断层泥状,构造、揉皱镜面发育,易拂搓成粉末或粉尘,无任何硬度

2 煤炭图像处理

通过手机拍照或者相册选取得到煤炭图片,根据

Hoek-Brown 准则,一般都是采用对比估算的原则来得到地质强度因子(GSI)值,但是这种方法耗时长,而且个人主观判断因素对结果影响较大,因此探究1个图像处理算法能简单快速检测地质强度因子(GSI)的值是很有必要的。图像处理算法主要是提取煤炭裂隙然后经过网格占比得出煤炭地质强度因子(GSI)。

2.1 图像获取

为方便观测,现将试验用到的所有煤样进行处理,使用环状钻头取心工具取出半径为50 mm、高度为200 mm的圆柱体煤样。将制成的煤心样本放于试验台,手机采集图像时角度垂直于煤心样本横截面,将煤心裂隙清晰显现。

2.2 裂隙检测

根据煤炭地质强度分类表,原生结构煤强度最高最稳定、裂隙最少,地质强度因子值 I_{GS} 为60~90之间;碎裂煤裂隙稍多,地质强度因子值 I_{GS} 为40~60;碎粒煤裂隙较多,地质强度因子值 I_{GS} 为20~40;糜棱煤最不稳定、裂隙最多,地质强度因子为10~20。因此得出结论,煤炭地质强度因子值 I_{GS} 会随着煤炭裂隙增多而降低,具有线性相关性。

图形边缘检测就是将图形的基本特征提取出来^[13-14],如图1所示,通过图形边缘检测可以将煤炭的裂隙提取出来,然后将煤炭裂隙图进行分析计算就可以得到煤炭地质强度因子值。图形边缘检测在Android开发中主要是通过调用OpenCV 机器视觉库来实现,OpenCV 常用于图像分割、图像边缘检测与图像识别等图像处理领域,因为开源免费的特性得到很大的应用。煤炭裂隙提取采用Candy边缘检测方法,此算法具有边缘细致平滑、抗噪声强等特点。

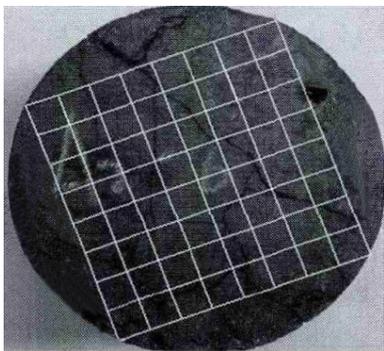


图1 分形维数理论

Fig.1 Fractal dimension theory

2.3 分形维数

分形维数来自于分形几何学,通过将不规则几何图形分成数个部分,对每个部分单独研究,进而得到不规则图形的几何性质^[15-17]。分形几何学是1种新兴的理论,在数学和工业领域都具有相当高的

研究价值。网格法是分形维数的1种重要研究方法,通过网格占比将煤炭裂隙复杂程度定量表示。

从图1所知,用8×8的网格将得到的煤炭裂隙图分为64份,对每个网格进行分析,计算有裂隙经过的网格的数量为 X ,无裂隙经过的网格数量为 Y 。煤炭地质强度因子值 I_{GS} 表达式为

$$I_{GS} = \frac{Y}{X + Y} \times 100 \quad (6)$$

地质强度因子(GSI)值 I_{GS} 越高,表明煤炭裂隙越少、越稳定;地质强度因子(GSI)值 I_{GS} 越低,表明煤炭裂隙越多,越不稳定。同理可将图片分为10×10、16×16等不同规格的网格依次处理,计算无裂隙经过的网格占比,来计算不同规格网格下的煤炭地质强度因子GSI的测试值^[18]。

3 手机软件设计

3.1 系统硬件平台

基于手机图像处理的煤炭GSI检测系统测试阶段硬件手机设备采用的是红米note 5 安卓智能手机,Android版本为7.1.2,手机处理器为美国高通骁龙435;手机后置摄像头为1300万像素,拍照清晰,价格低廉,操作流畅。检测系统APP适用于市场上流通的大部分安卓智能手机,适配性强、适用范围广。

3.2 手机软件界面

使用Android Studio 编程软件进行编译,打包生成APP取名为“探矿小助手”,应用Java语言和OpenCV 计算机视觉库进行图像处理计算。登录界面如图2a所示,用户注册的账号密码以及拍照图片与检测数据结果储存于Android数据库SQLite中以供以后使用,SQLite数据库体积轻巧功能强大,为系统数据处理提供了强大的支持。登录系统设置了短信验证功能,选择了Mob平台提供的开源的免费的短信验证模块SMS SDK,将该模块引入APP后可以成功实现短信验证服务。在登录界面输入账号密码,经过短信验证之后,即可通过点击“开始”按钮进入主界面进行下一步的操作。

主界面如图2b所示,主要分为3个部分。上部为图片获取单元,图片获取单元有2种方法获得图片:①种是通过“点击拍照”按钮启用安卓intent 隐式调用手机相机获取煤炭图片,②是通过点击“从相册选取”按钮从手机相册来获取存储的煤炭图片。通过以上2种方法获得的图片以bitmap形式显示于中央显示单元。下部为图像处理单元,通过Android系统引入OpenCV 视觉处理库来进行图像



(a) 登录界面 (b) 主界面

图 2 移动端界面

Fig.2 Mobile interface

数据处理,点击“灰度化”按钮可以将煤炭图片进行灰度处理,然后点击“数值分析”经过一系列图像处理算法计算之后,得到煤炭地质强度因子(GSI)值并显示在图片下方。

3.3 OpenCV 视觉库

OpenCV 是 1 个开源的跨平台视觉库,可以运行在 Android 操作系统上,手机摄像头获取到煤炭图片后,通过调用 OpenCV 计算机视觉库实现图像处理过程。首先,对获得的煤心图片进行灰度化处理。为了降低图像噪声,利用 OpenCV 提供的高斯滤波函数进行高斯模糊,并且可以更准确的计算图像梯度与边缘幅值。计算公式为

$$G_x(x,y) \approx \frac{1}{2} [S(x,y+1) - S(x,y) + (x+1,y+1) - S(x+1,y)]$$

$$G_y(x,y) \approx \frac{1}{2} [S(x,y) - S(x+1,y) + S(x,y+1) - S(x+1,y+1)] \quad (7)$$

式中: x,y 为图像中某点像素的纵横坐标; G_x,G_y 分别为像素点 x,y 方向梯度; S 为像素点的卷积模板。

然后根据 x,y 方向的梯度可以计算出该像素点的梯度幅值与角度,计算公式为

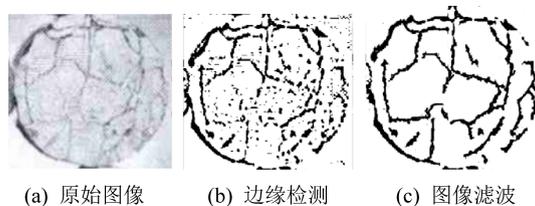
$$G(x,y) = \sqrt{G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)} \quad (8)$$

$$\theta(x,y) = \arctan[G_y(x,y)/G_x(x,y)]$$

式中: G,θ 分别为像素点梯度幅值及角度。

得到高斯滤波图像之后,为了更好实现煤炭图像裂隙边缘细化,需要调用 OpenCV 函数进行非最大信号压制。通过对比中心点的像素来确定边缘像素的去留,从而实现煤炭裂隙边缘细化。最终调用 OpenCV 二值化算法将煤炭裂隙图完整显示,如图 3 所示。

将裂隙图像用网格法分为若干等分,利用 OpenCV 图像处理算法遍历煤炭裂隙图像所有像



(a) 原始图像 (b) 边缘检测 (c) 图像滤波

图 3 OpenCV 裂隙检测

Fig.3 OpenCV crack detection

素,将有裂隙经过的网格标记,统计裂隙网格占比,即可得到煤炭 GSI 数值。系统流程图如图 4 所示。

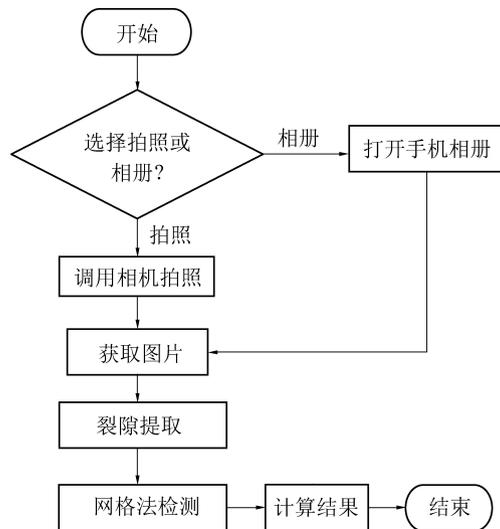


图 4 系统流程

Fig.4 System flow chart

4 试验方法

以焦作煤业集团九里山矿煤为试验样本,选取原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤、糜棱煤共 20 组煤样进行观测。根据测量要求,将 20 粒煤样制成半径 50 mm×高 200 mm 的圆柱体煤心,如图 5 所示。



图 5 煤心样本

Fig.5 Cataclastic Coal Samples

通过 Hoek-Brown 准则提出的地质强度因子 GSI 估算表来估算样本的 GSI 实际值。由 3 位专业技术人员来估算这 20 类样本的 GSI 实际值并

求取均值,这样可以减小因个人主观经验而造成的估算误差,实际值结果见表2。

表2 GSI实际值估算

Table 2 Estimation actual value of GSI

煤体结构	煤体表面结构	GSI 平均估值
原生结构煤	煤体完整,裂隙少,煤体硬度大	65、68、68、70、74、80
碎裂煤	块体有错动,有多组交切裂隙	41、45、47、52、52、58
碎粒煤	裂隙多,易捻成碎粒状	23、25、25、34
糜棱煤	煤体结构差,易捻成粉尘	14、17、19、20

在安卓手机编程时,分别选用规格为 5×5 、 10×10 、 25×25 的网格对煤炭样本进行拍照计算煤炭地质强度因子GSI值来确定最接近真实值的网格规格。根据结果显示: 10×10 规格的网格计算的GSI值较接近于真实值,因此本Android系统选用的计算网格为 10×10 规格。

以原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤、糜棱煤依次作为试验对象,用安卓智能手机对试验对象拍照获取样本照片,将煤炭图片进行灰度化、二值化、图形边缘检测等技术将煤炭裂隙图提取出来,再进行分形维数算法,以求得到煤炭地质强度因子(GSI)值。打开Android手机APP“探矿小助手”,登录之后选取样本照片进行数据处理,得到煤炭地质强度因子(GSI)数据结果并依次记录下来,将记录下来的数据与已知数据作对比,通过对比表1结果来判断本次试验数据稳定性。

5 系统验证

将20类煤炭样本使用专业设备制成煤心样品,并将煤心样品送往专业检测人员进行人工估算煤炭地质强度因子GSI,经人工估算后记录实际值。打开“探矿小助手”软件,登录后点击“拍照”,将要检测的煤心样品依次拍照,要求在煤心正上方拍照且能清晰看到煤心裂隙。拍照完成后点击“灰度化”、“数值分析”等待片刻后,即可检测到试验值并记录。选取20个煤炭作为试验样本,依次对煤炭进行数值分析,记录结果见表3,测试值与实际值曲线关系如图6所示,根据测量值与实际值的曲线图可知,本系统测量的GSI与真实值GSI具有线性拟合关系,从采集图像到给出数值时间小于5s。因此可以判定本系统检测的数据具有一定的稳定性和有效性,可以快速有效地测量出煤炭地质强度因子作为煤矿开采、瓦斯抽取等的参考数据。

表3 I_{GS} 测量值与实际值的关系Table 3 Relations between measured and actual values of I_{GS}

I_{GS}		I_{GS}	
实际值	测量值	实际值	测量值
14	24	47	48
17	25	52	45
19	34	52	42
20	33	58	50
23	29	65	69
25	33	65	58
25	37	68	61
34	40	70	64
41	45	74	61
45	41	80	78

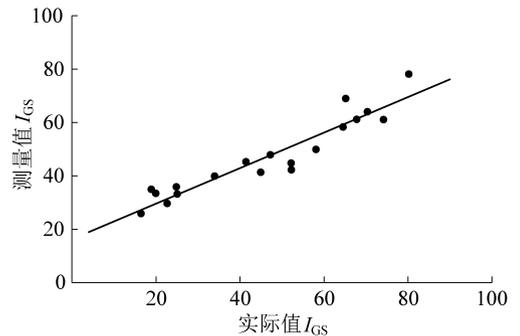


图6 测量值与实际值的关系

Fig.6 Relationship of measured value and actual value

6 结论

1) 开发设计了1种基于Android手机平台的煤炭地质强度因子(GSI)检测系统,应用Java语言与OpenCV计算机视觉算法编译成手机APP,通过手机图像处理定量化表示煤炭地质强度因子GSI。经过20类样本试验,检测结果与真实值误差较小,检测时间少于5s,大大减少人工测算的时间。

2) 提出了1种将分形维数应用于煤炭地质强度因子GSI的检测方法。通过手机获取煤样图片,经图像处理得到煤炭裂隙图,计算煤炭裂隙网格占比,得到煤炭地质强度因子GSI。

3) 将手机图像处理系统应用于工矿检测,大幅节省人力、物力、时间与成本,操作也更加简便。系统检测的煤炭地质强度因子(GSI)数值对煤矿开采、瓦斯抽取等煤炭工程具有参考意义,若要获得精确数值还需专业人员进行检测。

4) 方法可以定量化表示煤炭GSI,但仍需改进。煤心样本获取难度较高,需要专业设备支持,可探究1种直接对原煤进行手机图像处理检测的方案。煤炭裂隙图像出现噪声,直接影响煤炭GSI检测结果,仍需完善降噪处理算法。

参考文献 (References):

- [1] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1165-1186.
- [2] 王可意, 徐东强. 量化 GSI 在估计岩体力学参数中的应用研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2016, 13(11): 2168-2173.
WANG Keyi, XU Dongqiang. Application of quantitative GSI in the estimation of rock mechanics parameters [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2016, 13(11): 2168-2173.
- [3] 苏永华, 封立志, 李志勇, 等. Hoek-Brown 准则中确定地质强度指标因素的量化[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(4): 679-686.
SU Yonghua, FENG Lizhi, LI Zhiyong, et al. Quantification of elements for geological strength index in Hoek-Brown criterion [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(4): 679-686.
- [4] 李广生, 孙明闯, 史小卫, 等. 基于地质强度因子的煤体结构精细描述[J]. *中州煤炭*, 2015(7): 121-124.
LI Guangsheng, SUN Mingchuang, SHI Xiaowei, et al. Fine description of coal structure based on geological strength index [J]. *Zhangzhou Coal*, 2015(7): 121-124.
- [5] 范超, 王少雷. 基于地质强度因子(GSI)测定瓦斯抽采半径[J]. *山西焦煤科技*, 2014, 38(1): 36-38, 44.
FAN Chao, WANG Shaolei. Measure the gas drainage radius based on geological intensity factor [J]. *Shanxi Coking Coal Science & Technology*, 2014, 38(1): 36-38, 44.
- [6] 张立松, 闫相祯, 杨秀娟, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的节理扩展煤层破碎分级方法[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(S1): 164-169.
ZHANG Lisong, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan, et al. Fracture classification method of coal seam with joint propagation based on Hoek-Brown Criterion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(S1): 164-169.
- [7] 程虹铭, 乔元栋, 董川龙. 基于 Hoek-Brown 准则的水力压裂瓦斯抽采效果研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(9): 111-116.
CHENG Hongming, QIAO Yuandong, DONG Chuanlong. Study on hydraulic fractured gas drainage effect based on Hoek-Brown Criterion [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(9): 111-116.
- [8] 朱玺玺, 陈从新, 夏开宗. 基于 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数确定方法[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(9): 111-117.
ZHU Xixi, CHEN Congxin, XIA Kaizong. Methods of obtaining mechanics parameters of rock mass based on hoek-brown criterion [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(09): 111-117.
- [9] 郭红玉, 拜阳, 蒯海晓, 等. 煤体结构全程演变过程中渗透特性试验研究及意义[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(11): 2263-2268.
GUO Hongyu, BAI Yang, LIAN Haixiao, et al. Experimental study on permeability characteristics in complete evolution process of coal structure and its significance [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(11): 2263-2268.
- [10] 季虎, 孙即祥, 邵晓芳. 图像边缘提取方法及展望[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 14, 70-73.
JI Hu, SUN Jixiang, SHAO Xiaofang. The algorithm for image edge detection and prospect [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 14, 70-73.
- [11] 许家林, 钱鸣高. 应用图像分析技术研究采动裂隙分布特征[J]. *煤矿开采*, 1997(1): 37-39.
XU Jialin, QIAN Minggao. The research of fractures characteristics of the mining by using the image analysis technology [J]. *Coal Mining Technology*, 1997(1): 37-39.
- [12] 苏现波, 宋金星, 郭红玉, 等. 煤矿瓦斯抽采增产机制及关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12): 1-30.
SU Xianbo, SONG Jinxing, GUO Hongyu, et al. Increasing production mechanism and key technology of gas extraction in coal mines [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 1-30.
- [13] 王国艳, 于广明, 于永江, 等. 采动岩体裂隙分维演化规律分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(6): 859-863.
WANG Guoyan, YU Guangming, YU Yongjiang, et al. Study on cracks fractal evolution laws of mining rock mass [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(06): 859-863.
- [14] 高明忠, 金文城, 郑长江, 等. 采动裂隙网络实时演化及连通性特征[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(9): 1535-1540.
GAO Mingzhong, JIN Wencheng, ZHENG Changjiang, et al. Real-time evolution and connectivity of mined crack network [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(9): 1535-1540.
- [15] 康琴琴, 陈练武, 李卫波, 等. 分形理论在金华山煤矿断层评价中的应用[J]. *山西煤炭*, 2012, 31(1): 65-66, 48.
KANG Qinqin, CHEN Lianwu, LI Weibo. Application of fractal theory in evaluating the complexity of structure in Jinhua coal mine [J]. *Shaanxi Coal*, 2012, 31(1): 65-66, 48.
- [16] 李宏艳, 王维华, 齐庆新. 基于分形理论的采动裂隙时空演化规律研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6): 1023-1030.
LI Hongyan, WANG Weihua, QI Qingxin. Study on fissure development rule of overlying strata influenced by mining based on fractal theory [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1023-1030.
- [17] 谢和平. 断层分形分布之间的相关关系[J]. *煤炭学报*, 1994, 19(5): 445-449.
XIE Heping. Correlation between fractal distributions of faults [J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(5): 445-449.
- [18] 韩颖, 张飞燕, 刘晓, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的煤层钻孔失稳破坏类型数值模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S1): 308-318.
HAN Ying, ZHANG Feiyan, LIU Xiao, et al. Numerical simulation of instability and failure types of coalbed borehole based on Hoek-Brown criterion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 308-318.