

文章编号: 1671-251X(2023)02-0134-07

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2022090015](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2022090015)

## 采空区垮落煤岩渗透特性研究

杨晓晨<sup>1</sup>, 贾男<sup>2</sup>, 张晓明<sup>3</sup>, 佐佐木久郎<sup>4</sup>

(1. 辽东学院 城市建设学院, 辽宁 丹东 118003; 2. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122;  
3. 辽宁工程技术大学 工程与环境研究所, 辽宁 葫芦岛 125105; 4. 九州大学 工学府, 日本 福冈 819-0395)

**摘要:** 地震法常用于分析采空区垮落煤岩孔隙率和渗透率的相关性, 现有研究大多采用有效介质理论, 将采空区垮落煤岩的各向异性和不均匀性转换为等效的介质参数, 对粒径、孔隙率、空间特征等因素对地震波的影响考虑较少。以采空区垮落煤岩为研究对象, 根据实际采空区垮落煤岩颗粒级配和孔隙率, 制备了破碎煤岩样品, 通过实验验证了其孔隙率和波长-粒径比与实际采空区垮落煤岩一致。在此基础上, 通过实验分析了煤岩粒径、孔隙率、地震波频率等因素对波速、振幅衰减系数及渗透率的影响, 结果表明: 破碎煤岩中 P 波速度随孔隙率增大而减小, 随粒径增大而增大, 受地震波频率影响较小; 振幅衰减系数随孔隙率增大而增大, 随粒径增大而减小, 孔隙率较大时更易受地震波频率影响; 破碎煤岩的渗透率随孔隙率和粒径增大而增大, 遵循 Kozney-Carman 方程, 基于实验结果建立了采空区垮落煤岩渗透率预测公式, 计算得现场采空区垮落煤岩渗透率为  $1.225 \times 10^{-12} \sim 178.930 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ; 为消除粒径对地震波振幅衰减系数和煤岩样品渗透率的影响, 提出单位波长振幅衰减系数(振幅衰减因子), 并通过最小二乘法拟合得到振幅衰减因子与渗透率之间的经验关系式, 为初步判断采空区垮落煤岩的渗透率提供了思路。

**关键词:** 采空区; 垮落煤岩; 渗透率; 孔隙率; 地震波法; 波长-粒径比; 振幅衰减系数

中图分类号: TD72 文献标志码: A

Study on permeability characteristics of caved coal and rock in goaf

YANG Xiaochen<sup>1</sup>, JIA Nan<sup>2</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>3</sup>, SASAKI Kyuro<sup>4</sup>

(1. School of Urban Construction, Eastern Liaoning University, Dandong 118003, China; 2. CCTEG Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China; 3. Institute of Engineering and Environment, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 4. Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0385, Japan)

**Abstract:** The seismic method is often used to analyze the correlation between porosity and permeability of caved coal and rock in goaf. Most of the existing studies adopt the effective medium theory, which convert the anisotropy and inhomogeneity of caved coal and rock in goaf into equivalent medium parameters. The influence of particle size, porosity, spatial characteristics and other factors on the seismic wave is less considered. Taking the caved coal and rock in goaf as the research object, the broken coal and rock samples are prepared according to the actual particle gradation and porosity of the caved coal and rock in goaf. The porosity and wavelength-particle size ratio of the caved coal and rock samples are verified to be consistent with those of the caved coal and rock in the actual goaf. On this basis, the influence of coal and rock particle size, porosity and seismic wave frequency on wave velocity, amplitude attenuation coefficient and permeability is analyzed through experiments. The P-wave velocity in broken coal and rock decreases with the increase of porosity, increases with the increase of particle size, and is less affected by seismic wave frequency. The amplitude attenuation coefficient increases with porosity and decreases with the increase of particle size, and is more easily affected by seismic wave frequency when

收稿日期: 2022-09-12; 修回日期: 2023-02-11; 责任编辑: 李明。

基金项目: 辽宁省科技人才与自然科学基金资助项目(2020-BS-232); 辽宁省教育厅基本科研资助项目(LJKQZ2021132)。

作者简介: 杨晓晨(1988—), 男, 辽宁丹东人, 讲师, 博士, 主要研究方向为岩体动力灾害防治, E-mail: xiaochen2024@163.com。

引用格式: 杨晓晨, 贾男, 张晓明, 等. 采空区垮落煤岩渗透特性研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(2): 134-140.

YANG Xiaochen, JIA Nan, ZHANG Xiaoming, et al. Study on permeability characteristics of caved coal and rock in goaf[J].

Journal of Mine Automation, 2023, 49(2): 134-140.



扫码移动阅读

porosity is larger. The permeability of broken coal and rock increases with the increase of porosity and particle size. According to the Kozney-Carman equation, the permeability prediction formula of coal and rock in goaf is established based on the experimental results. The calculated permeability of caved coal and rock in goaf is  $1.225 \times 10^{-12}$ - $178.930 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ . In order to eliminate the influence of particle size on the amplitude attenuation coefficient of seismic wave and the permeability of coal and rock samples, the amplitude attenuation coefficient of unit wavelength (amplitude attenuation factor) is proposed. The empirical relationship between the amplitude attenuation factor and the permeability is obtained by least square fitting. The study provides a thought for preliminarily judging the permeability of caved coal and rock in goaf.

**Key words:** goaf; caved coal and rock; permeability; porosity; seismic wave method; wavelength-particle size ratio; amplitude attenuation coefficient

## 0 引言

2021年我国煤炭消费约41.3亿t,约占全国能源消费总量的56%、世界煤炭消费总量的50%<sup>[1]</sup>。我国95%以上的煤炭资源为井下开采<sup>[2]</sup>,大量开采不可避免地形成地下采空区,严重威胁煤矿安全生产和地表环境。煤炭开采会释放大量原煤层中吸附的瓦斯,并在采空区产生瓦斯聚集现象<sup>[3]</sup>,同时新鲜空气可通过高渗透路径扩散到采空区内部,为煤自燃提供氧气。因此,采空区具有遗煤自燃、瓦斯爆炸等多重风险<sup>[4]</sup>,还可能引发矿井透水<sup>[5]</sup>、地表沉陷<sup>[6]</sup>等灾害。

孔隙率和渗透率是分析采空区内渗流场分布和瓦斯抽采的关键参数<sup>[7]</sup>。如何准确测定垮落煤岩体的力学参数和几何参数是分析采空区内部状态的基础<sup>[8]</sup>。褚廷湘等<sup>[9]</sup>通过自行设计的监测仪器,评估了压实碎煤在不同粒度、应力和温度条件下的渗透率、应变和孔隙率演变。C. Ö. Karacan等<sup>[10]</sup>提出了一种利用流体和颗粒分形指数方程预测采空区不规则垮落岩石孔隙率和渗透率的方法。但采空区无法通过直接测量法测定垮落煤岩的孔隙率和渗透率,因此许多非接触式测量方法因高灵敏度、快速性和非接触传导优势而用于探测采空区空间特征<sup>[11-12]</sup>,其中应用最多的为地震法<sup>[13]</sup>。蒋法文等<sup>[14]</sup>利用高精度三维地震数据和地震属性分析技术,准确预测了陷落柱、煤巷和采空区的空间分布。李亚林等<sup>[15]</sup>在实验室采用超声波技术分析了地震波速度和振幅衰减等地震特征与破碎岩石孔隙率和渗透率之间的相关性。上述研究大多采用有效介质理论,将采空区垮落煤岩的各向异性和不均匀性转换为等效的介质参数,对垮落煤岩粒径、孔隙率、空间特征等因素对地震波的影响考虑较少<sup>[16]</sup>。

本文以采空区垮落煤岩为研究对象,考虑真实采空区垮落煤岩的粒径、孔隙率、地震波波长与煤

岩颗粒粒径的比值(波长-粒径比)等参数,通过实验分析了地震波波长、振幅衰减系数与渗透率的变化特征,并提出经验公式,以评估实际采空区垮落煤岩渗透特性。

## 1 实验过程

### 1.1 破碎煤岩样品准备

实验采用砂岩、烟煤、褐煤3种岩性样品。实验煤样来自阜新弘霖矿业(集团)有限公司(以下称弘霖煤矿)2302工作面(褐煤)、焦作煤业(集团)有限责任公司赵固一矿8101工作面(烟煤),岩样来自弘霖煤矿2208工作面顶板。采用热重法测定煤样组分,采用X射线荧光法测定砂岩矿物组成,结果见表1、表2。对煤岩样品的完整岩芯测量弹性模量、泊松比、P波速度、S波速度和密度,并利用力学模量之间的弹性关系计算得到体积模量和剪切模量,结果见表3。

表1 煤样组分分析结果

Table 1 Composition analysis results of coal samples %

煤样	水分	固定碳	灰分	挥发分	硫
褐煤	8.2	33.7	19.3	36.8	2.0
烟煤	4.5	54.7	17.4	20.6	2.8

表2 砂岩样品化学成分分析结果

Table 2 Chemical composition analysis results of sandstone sample %

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO
93.13	3.86	0.11	0.54	0.25

表3 煤岩样品力学参数

Table 3 Mechanical parameters of coal and rock samples

样品	弹性模量/GPa	体积模量/GPa	泊松比	剪切模量/GPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	P波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	S波速度/(m·s <sup>-1</sup> )
砂岩	8.10	6.55	0.22	4.70	2 551	2 350	1 157
烟煤	1.70	1.67	0.33	0.63	1 845	2 150	638
褐煤	1.53	1.20	0.34	0.56	1 690	2 102	629

制备破碎煤岩样品时,采用破碎装置将煤岩块破碎,根据粒径将煤岩颗粒分成3组,粒径范围分别为0.12~0.25,0.25~0.50,0.50~1.00 mm。将煤岩颗粒装入内径为40 mm的圆柱形PVC管,放入自制高强度不锈钢套筒中,如图1所示。采用单轴压缩机将煤岩颗粒压入PVC管,在不锈钢套管的约束下,保证压缩过程径向无变形,通过逐级压缩方式控制样品高度和均匀性。颗粒压缩后,对两端表面进行打磨处理。

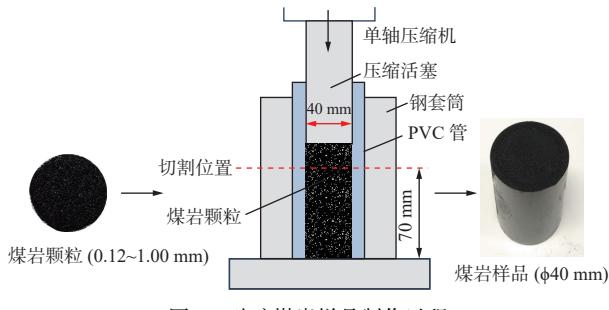


图1 破碎煤岩样品制作过程

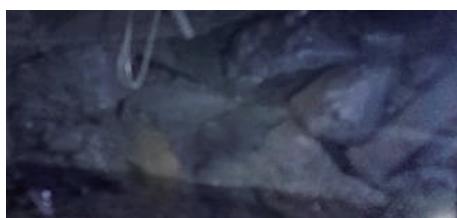
Fig. 1 Manufacturing process of broken coal and rock samples

## 1.2 样品与采空区实际垮落煤岩的相似性分析

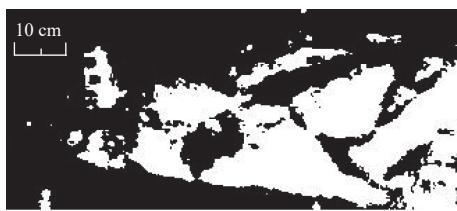
### 1.2.1 煤岩颗粒级配

根据文献[17]可知,破碎状岩石的力学模量与尺寸关系不大,而与颗粒级配密切相关。因此,本文将现场垮落煤岩按照与现场相同的级配同比例缩小,所得煤岩样品具有与现场实际煤岩相似的力学性质。

现场采集赵固一矿8101工作面(长190 m,液压支架间距为1.75 m)液压支架后方垮落煤岩图像,每架采集3张,共303张。对图像中煤岩进行粒径分析,如图2所示,得到垮落煤岩粒径为40~450 mm,集中在150~360 mm,这与文献[18]结果趋于一致。



(a) 原图



(b) 块径尺寸提取图像

图2 赵固一矿8101工作面液压支架后方垮落煤岩图像

Fig. 2 Caved coal and rock images behind hydraulic support in 8101 working face of Zhaogu No. 1 Coal Mine

实验中将180~450 mm粒径范围的煤岩颗粒按450:1,900:1,1800:1的比例缩小至实验室尺寸要求,如图3所示(以砂岩为例)。

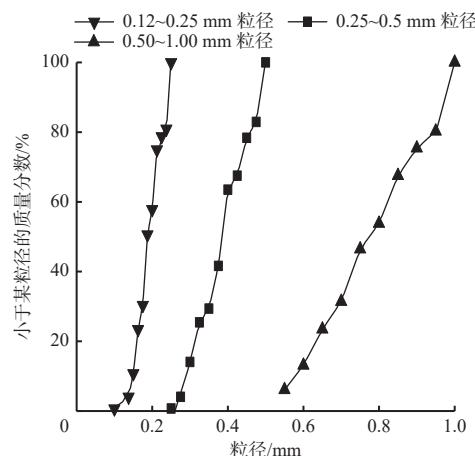


图3 砂岩样品粒径级配曲线

Fig. 3 Gradation curves of sandstone sample particles

### 1.2.2 孔隙率

根据文献[19]可知,采空区内垮落煤岩的孔隙率范围为0.20~0.45。因本文在制备样品过程中不使用任何粘合剂,为避免煤岩样品在实验过程中破碎,选用0.21~0.33孔隙率。由此制备的破碎煤岩样品具有与实际采空区垮落煤岩相似的孔隙分布特征和气体渗流通道。记录压缩过程中加卸载曲线,考虑活塞行程中样品的回弹性,通过激光测量液压活塞的行程,并通过式(1)控制样品的孔隙率。

$$\varphi = 1 - \frac{m}{S_s L \rho_s} \quad (1)$$

式中: $\varphi$ 为孔隙率;  $m$ 为样品质量, kg;  $S_s$ 为样品的基本面积,  $\text{m}^2$ ;  $L$ 为样品长度, m;  $\rho_s$ 为样品颗粒密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 1.2.3 波长-粒径比

根据文献[11, 20]可知,P波速度与地震波频率直接相关,现场实验多采用30~150 Hz中心频率,根据实测速度可知,P波波长为6~70 m。采空区垮落煤岩尺寸集中在150~360 mm,由此可知波长-粒径比为35~125。

与现场实验相比,本文实验采用小尺寸(0.12~1.00 mm)煤岩样品。为保证实验结果与现场实验一致,选用24~87 kHz作为测定频率,使得波长-粒径比为8~115,与现场基本一致。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 地震波波速及振幅衰减系数测定

实验中以超声波模拟地震波。采用超声波脉冲传输装置测量波速和振幅衰减系数。超声波换能器

Pundit Lab+ 250 在 500 V 高压驱动下,可在 24~500 kHz 宽频段内工作。换能器探头直径为 40 mm,与煤岩压缩样品直径一致。采用透射法测定波速与振幅衰减系数。将 2 个超声波换能器分别与煤岩样品上下表面接触,使用硅胶耦合剂来减小传感器与样本表面的间隙。换能器在样品一侧激发方形脉冲波,在另一侧接收脉冲波,通过集成软件 Punditlink 将接收信号显示在示波器上,之后传输到地震处理系统进行存储和处理。系统自动捕捉首波到时并计算波速。采用快速傅里叶变换将时程数据转换为频谱数据,根据发送信号和接收信号的振幅比计算单位长度振幅衰减系数  $\beta$ 。

$$\beta = -\frac{1}{x} \ln \frac{A_1}{A_0} \quad (2)$$

式中:  $x$  为传播距离, m, 本文为煤岩样品长度;  $A_1$  为透射波振幅, mm;  $A_0$  为入射波振幅, mm。

实验中换能器仅贴附在样品两端,测量时不施加压力,因此不影响样品的孔隙率。实验前对 PVC 管包覆煤岩样品和裸样品进行对比测试,结果表明因 PVC 管造成的波速和振幅误差均在 2% 以内,可忽略不计。

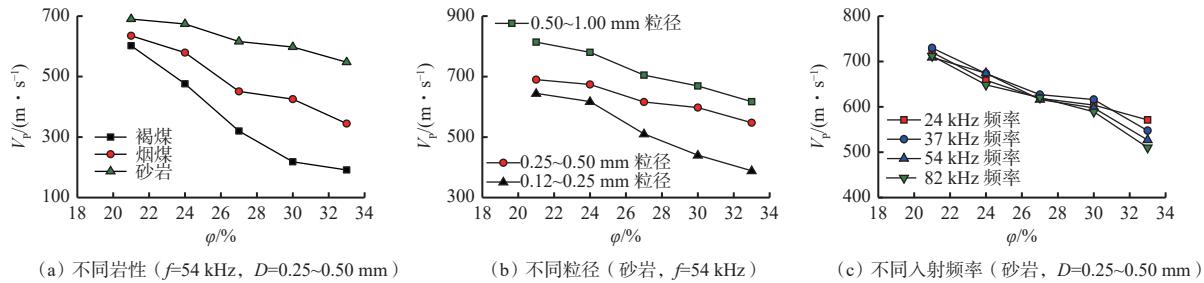


图 4 煤岩样品波速与孔隙率关系

Fig. 4 Relationship between wave velocity and porosity of coal and rock samples

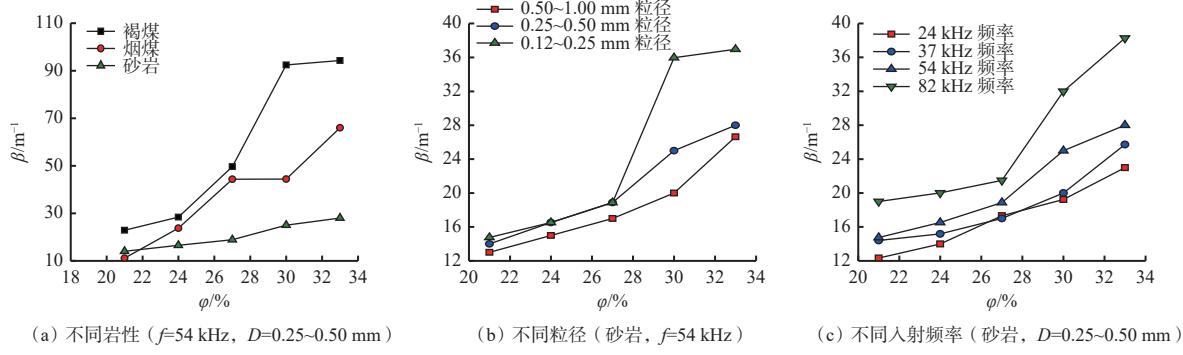


图 5 煤岩样品振幅衰减系数与孔隙率关系

Fig. 5 Relationship between amplitude attenuation coefficient and porosity of coal and sample samples

从图 4(a) 可看出,对于不同岩性的样品,P 波速度均随孔隙率的增大而逐渐减小。 $f=54$  kHz,  $D=0.25\sim0.50$  mm 条件下,相同孔隙率的砂岩样品中

### 1.3.2 渗透率测定

采用稳态法测定渗透率。从样品中心及其附近两点向样品中稳定持续输入氦气,通过压力调节器在样品两端施加 0.01~1 MPa 气压,通过样品上下游的气体压力传感器 HBP-03 测量样本两端压差,通过下游的气体质量流量计 MF4719 测量气体流速。采用气封方式实现样品侧部密封,因有 PVC 管包覆,气压仅起密闭作用,不影响样品围压。通过样品下游的气体流量控制器 AST10-ALC 控制气体流速,保证雷诺数在 2 000 以内。渗透率根据达西定律(式(3))计算。

$$k = -\frac{Q\mu L}{S \Delta P} \quad (3)$$

式中:  $k$  为煤岩渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $Q$  为气体流速,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\mu$  为气体黏度系数,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $L$  为煤岩样品长度,  $\text{m}$ ;  $S$  为煤岩样品横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta P$  为压差,  $\text{Pa}$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 波速与振幅衰减系数

不同岩性、粒径  $D$  和入射频率  $f$  下, P 波速度  $V_p$  与孔隙率  $\varphi$ 、振幅衰减系数  $\beta$  的关系分别如图 4、图 5 所示。

P 波速度比煤样大,且随着孔隙率增大,二者的波速差逐渐增大,说明煤样中波速受孔隙率影响较大,主要原因:砂岩颗粒趋于球形,其孔隙通常是相对连通

的,有利于波的传播,而煤颗粒多为不规则形状,其孔隙通常是相对孤立的,不利于波的传播;破碎砂岩的孔隙通常是规则的球形,可更好地传导波,而煤的孔隙通常是不规则的管状,可能导致波的反射和散射,降低其传播速度,且孔隙率越大,该现象越明显。从图 4(b)可看出,  $f=54 \text{ kHz}$  条件下,砂岩中 P 波速度随粒径增大而增大,即在相同的孔隙率下,与较小粒径样品相比,波在粒径较大的样品中传播更快。这是因为在大粒径样品中含有更少的孔隙和不连续面,使得波在传播中所受阻碍更小;波在煤岩样品中沿不连续面传播,大粒径样品的不连续面较大,使得其刚度较大,更有利波的传播。从图 4(c)可看出,  $D=0.25 \sim 0.50 \text{ mm}$  条件下,频率对波速的影响十分有限,仅当砂岩样品的孔隙率较大(33%)时表现为高频波速小于低频波速,原因是孔隙率较小时,波长远大于孔隙尺寸,所以频散现象很弱,当孔隙率增大时,高频波的波长逐渐接近孔隙尺寸,表现为波速减小。煤样的实验结果与砂岩样品一致。

从图 5(a)可看出,  $f=54 \text{ kHz}$ ,  $D=0.25 \sim 0.50 \text{ mm}$  条件下,3 种不同岩性样品中波的振幅衰减系数随孔隙率的增大而增大。不同岩性样品之间振幅衰减系数的差异源于颗粒之间不连续面的刚度不同。砂岩颗粒之间的不连续面刚度大于煤样,波通过不连续

面时能量损失更小,因此振幅衰减系数更小。从图 5(b)可看出,  $f=54 \text{ kHz}$  条件下,随着砂岩样品粒径减小,振幅衰减系数迅速增大。较小粒径颗粒的振幅衰减系数-孔隙率曲线斜率大于较大粒径颗粒,说明波在较小粒径颗粒中的振幅衰减系数更易受到孔隙率变化影响。当孔隙率下降到 21% 时,3 种粒径的振幅衰减系数基本相同,说明孔隙率较小时,振幅衰减系数对粒径变化不敏感。从图 5(c)可看出,与波速相比,振幅衰减系数受波的频率影响更大,且该影响随孔隙率的增大更加明显。当孔隙率为 21% 时,82 kHz 频率波的振幅衰减系数比 24 kHz 频率波增加 54.2%,而当孔隙率增大到 33% 时,振幅衰减系数增加 66.4%,说明孔隙率较大时,波的振幅衰减系数更易受频率影响。煤样实验结果与砂岩样品一致。

## 2.2 渗透率

不同岩性样品的孔隙率对渗透率的影响如图 6 所示。可看出 3 种煤岩样品的渗透率均随孔隙率增大而增大;在相同的孔隙率和粒径下,烟煤和褐煤的渗透率大于砂岩,原因是煤样制备过程更易受到压力的影响,虽然孔隙率相同,但煤样更易破碎,样品中存在更多的气流通道。另外,因较大粒径颗粒样品存在更大的孔隙喉道,所以其渗透率大于较小粒径颗粒。

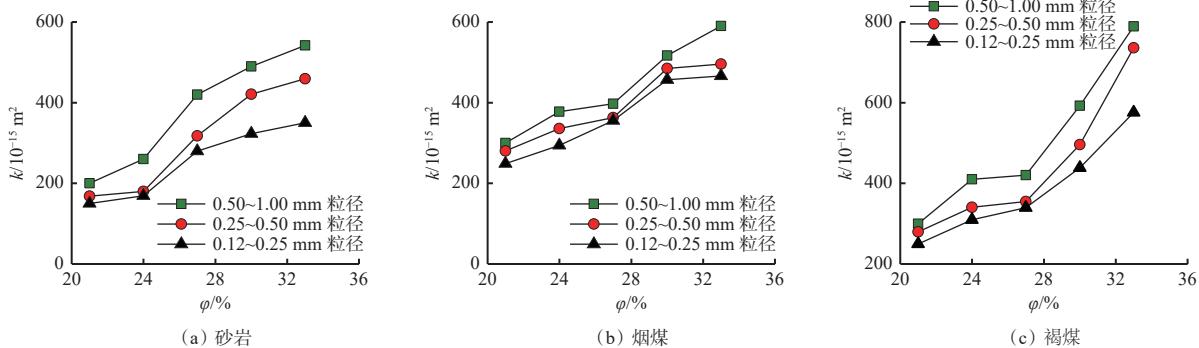


图 6 煤岩样品渗透率与孔隙率关系

Fig. 6 Relationship between permeability and porosity of coal and rock samples

采用 Kozney-Carman 方程(式(4))分析破碎煤岩渗透率与孔隙率、粒径之间的关系。

$$k = aF(D, \varphi) = a \frac{D^2 \varphi^3}{(1 - \varphi)^2} \quad (4)$$

式中:  $a$  为考虑形状因子、比表面积和迂曲度的系数;  $F(D, \varphi)$  为孔隙特征系数,  $\text{m}^2$ 。

实验测得 21%~33% 孔隙率的破碎煤岩渗透率与孔隙特征系数  $F(D, \varphi)$  关系如图 7 所示。可看出二者呈线性关系,遵循 Kozney-Carman 方程的趋势性。经最小二乘法拟合计算后发现,系数  $a=2.2 \times 10^{-5}$ , 小于经验值  $1/180$  或  $1/150$ <sup>[20]</sup>, 原因可能是破碎

样品中含有更大的迂曲度和比表面积。基于实验所得的煤岩渗透率与孔隙率、粒径的相关性,可根据采空区现场的煤岩颗粒粒径和孔隙率来预测其渗透率。图 7 中阴影部分的面积即为通过式(4)计算得到的现场采空区垮落煤岩的渗透率,为  $1.225 \times 10^{-12} \sim 178.930 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ,与文献[21]研究结果高度一致。

## 2.3 振幅衰减因子与渗透率的相关性

在实际采空区中,煤岩块度与勘测地震波的波长均大于实验室条件下的值,而单位长度振幅衰减系数  $\beta$  受地震波的频率影响较大。因此,通过

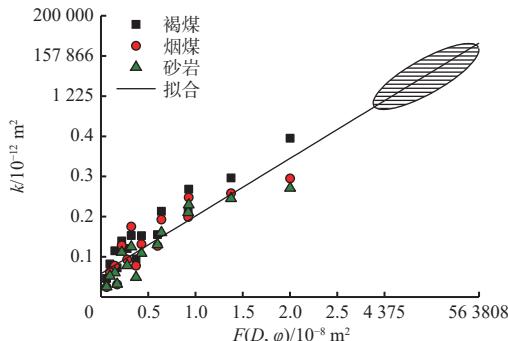


图 7 煤岩样品渗透率与孔隙特征系数关系

Fig. 7 Relationship between permeability and pore characteristic coefficient of coal and rock samples

式(5)计算单位波长的振幅衰减(振幅衰减因子),使得实验室测量结果更接近现场实测值。

$$\frac{1}{Q} = -\frac{V_p \ln(A_1/A_0)}{\pi f x} = \frac{\beta V_p}{\pi f} \quad (5)$$

为了消除粒径对振幅衰减因子和渗透率的影响,对渗透率 $k$ 进行去粒径处理( $k/D^2$ )。3种岩性样品在不同粒径和孔隙率下的振幅衰减因子 $1/Q$ 与 $k/D^2$ 关系曲线如图8所示。可看出随着孔隙率增大, $1/Q$ 与 $k/D^2$ 呈一定的正相关性,3种岩性样品在不同区段内均表现出相似的趋势。通过拟合线性关系,可得振幅衰减因子与破碎煤岩渗透率之间的经验关系式:

$$\frac{k}{D^2} = 1.1 \times 10^{-4} \frac{1}{Q} \quad R^2 = 0.55 \quad (6)$$

式中 $R^2$ 为相关性系数。

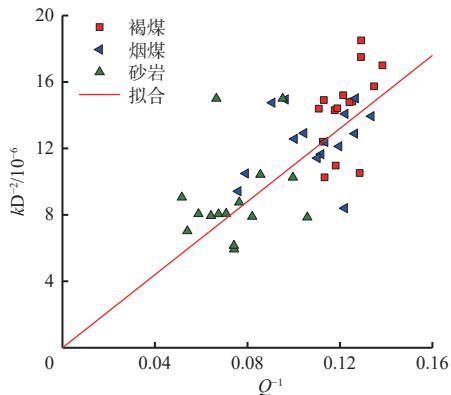


图 8 煤岩样品振幅衰减因子与渗透率关系

Fig. 8 Relationship between amplitude attenuation and permeability factor of coal and rock samples

### 3 结论

1) 基于实际采空区垮落煤岩的块度分布和孔隙分布特征,制作了实验用小尺寸破碎煤岩样品。通过实验室超声波测定了样品在不同粒径、孔隙率和频率下的波速和振幅衰减系数。结果表明小尺寸煤

岩样品的波速和振幅衰减系数与既往现场实测结果基本一致,且粒径越大,样品的波速越大、振幅衰减系数越小,波速和振幅衰减系数受频率的影响随孔隙率的增大而增大。

2) 煤岩样品的渗透率随孔隙率和粒径增大而增大。破碎煤岩样品的渗透率与 Kozney-Carman 方程吻合良好,但涉及形状因子、迂曲度和比表面积的系数小于经验值。根据经验公式推测现场采空区垮落煤岩的渗透率为 $1225 \times 10^{-12} \sim 178930 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ,与既往研究结果具有高度相似性。

3) 通过最小二乘法拟合计算得到采空区地震波振幅衰减因子与渗透率的经验关系式,为初步判断采空区垮落煤岩的渗透率提供了思路,从而为进一步预测采空区遗煤自燃和瓦斯运移规律提供依据。

### 参考文献(References):

- [1] Review of world energy 2021 [EB/OL]. [2022-08-12]. [https://www.bp.com/zh\\_cn/china/home/news/reports/statistical-review-2021.html](https://www.bp.com/zh_cn/china/home/news/reports/statistical-review-2021.html).
- [2] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331-2345.  
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331-2345.
- [3] 袁亮, 郭华, 李平, 等. 大直径地面钻井采空区瓦斯抽采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 1-8.  
YUAN Liang, GUO Hua, LI Ping, et al. Theory and technology of goaf gas drainage with large-diameter surface boreholes [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 1-8.
- [4] 徐宇, 李孜军, 翟小伟, 等. 开采过程中采空区煤自燃与瓦斯复合致灾隐患区域研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊2): 585-592.  
XU Yu, LI Zijun, ZHAI Xiaowei, et al. Potential coupled hazard zone of coal spontaneous combustion and gas in goaf under mining condition [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 585-592.
- [5] 李超峰. 煤层顶板含水层涌水危险性评价方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊1): 384-392.  
LI Chaofeng. Method for evaluating the possibility of water inrush from coal seam roof aquifer [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 384-392.
- [6] 黄平路, 陈从新, 肖国峰, 等. 复杂地质条件下矿山地下开采地表变形规律的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3020-3024.  
HUANG Pinglu, CHEN Congxin, XIAO Guofeng, et al. Study of rock movement caused by underground mining in mines with complicated geological conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3020-3024.
- [7] 王玉涛. 采空区多孔介质孔隙率与渗透特性三维空间

- 动态分布模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(10): 40-46.
- WANG Yutao. Three-dimensional spatial dynamic distribution model on porosity and permeability characteristics of porous media in goaf[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(10): 40-46.
- [8] 梁运涛, 张腾飞, 王树刚, 等. 采空区孔隙率非均质模型及其流场分布模拟[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1203-1207.
- LIANG Yuntao, ZHANG Tengfei, WANG Shugang, et al. Heterogeneous model of porosity in gobbs and its airflow field distribution[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1203-1207.
- [9] 褚廷湘, 姜德义, 余明高. 承压颗粒煤逐级加载下渗透特性实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 1058-1065.
- CHU Tingxiang, JIANG Deyi, YU Minggao. Experimental study of the seepage properties of the compacted particle coal under gradual loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 1058-1065.
- [10] KARACAN C Ö, ESTERHUIZEN G S, SCHATZEL S J, et al. Reservoir simulation-based modeling for characterizing longwall methane emissions and gob gas venthole production[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 71(2/3): 225-245.
- [11] 王伟, 高星, 李松营, 等. 槽波层析成像方法在煤田勘探中的应用——以河南义马矿区为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 1054-1062.
- WANG Wei, GAO Xing, LI Songying, et al. Channel wave tomography method and its application in coal mine exploration: An example from Henan Yima Mining Area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 1054-1062.
- [12] HANSON D R, VANDERGRIFT T L, DEMARCO M J, et al. Advanced techniques in site characterization and mining hazard detection for the underground coal industry[J]. International Journal of Coal Geology, 2002(50): 275-301.
- [13] 薛国强, 潘冬明, 于景邨. 煤矿采空区地球物理探测应用综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 2187-2192.
- (上接第 133 页)
- [19] BORGHESANI P, RICCI R, CHATTERTON S, et al. A new procedure for using envelope analysis for rolling element bearing diagnostics in variable operating conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(1): 23-35.
- [20] WU Jie, ZI Yanyang, CHEN Jinglong, et al. A modified tacho-less order tracking method for the surveillance and diagnosis of machine under sharp speed variation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 128: 508-527.
- [21] 顾佶智, 师蔚, 胡定玉, 等. 强背景噪声下基于谱峭度-波束形成轴承故障特征提取[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(3): 110-115.
- XUE Guoqiang, PAN Dongming, YU Jingcun. Review the applications of geophysical methods for mapping coal-mine voids[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2187-2192.
- [14] 蒋法文, 黄晖, 张振生, 等. 高精度三维地震勘探技术在煤田安全生产中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(2): 60-64.
- JIANG Fawen, HUANG Hui, ZHANG Zhensheng, et al. Application of high precision 3D seismic prospecting technology in coalfield safety production[J]. Coal Geology of China, 2014, 26(2): 60-64.
- [15] 李亚林, 贺振华, 黄德济, 等. 岩石孔渗特性与地震波衰减、传播速度的相互关系[J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 7-12.
- LI Yalin, HE Zhenhua, HUANG Deji, et al. Relation between rock porosity-permeability property and seismic wave attenuation and propagation velocity[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(4): 7-12.
- [16] 张春, 题正义, 李宗翔. 采空区孔隙率的空间立体分析研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(6): 52-57.
- ZHANG Chun, TI Zhengyi, LI Zongxiang. Porosity of goaf in three dimensions[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(6): 52-57.
- [17] FUMAGALLI E. Tests on cohesionless materials for rockfill dams[J]. ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal, 1969, 95(1): 313-330.
- [18] PAPPAS D M, MARK C. Behavior of simulated longwall gob material[R]. Washington: United States Department of the Interior, 1993.
- [19] WANG Gang, XU Hao, WU Mengmeng, et al. Porosity model and air leakage flow field simulation of goaf based on DEM-CFD[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(7): 1-17.
- [20] KARACAN C Ö. Prediction of porosity and permeability of caved zone in longwall gobbs[J]. Transport in Porous Media, 2010, 82(2): 413-439.
- [21] SZLAZAK J. The determination of a co-efficient of longwall gob permeability[J]. Archives of Mining Sciences, 2001, 46(4): 451-468.