

中文引用格式:郝荷杰,王瑞哲,杨二豪,等. 超声波激励时长对煤体孔裂隙结构及渗透特性的影响[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9):155-164.

英文引用格式:HAO Hejie, WANG Ruizhe, YANG Erhao, et al. Effect of ultrasonic excitation time on pore and crack structure and permeability characteristics of coal [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9):155-164.

超声波激励时长对煤体孔裂隙结构及渗透特性的影响*

郝荷杰¹, 王瑞哲^{**1}, 杨二豪²讲师, 仇悦¹, 张笑盈¹, 林海飞^{1,3}教授

(1 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 3 西部煤矿瓦斯灾害防控陕西省高等学校重点实验室, 陕西 西安 710054)

中图分类号:X935

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.09.1234

基金项目:国家自然科学基金资助(52174207); 陕西省杰出青年基金资助(2020JC-48); 陕西省自然科学基金联合项目资助(2019JLP-02)。

【摘要】 为探究超声波激励作用下不同激励时长对煤体损伤的特性, 利用超声波激励试验系统、核磁共振成像系统、体视显微镜、煤岩芯渗透率自动测试系统等, 分析不同超声波激励时长下煤体孔裂隙结构、表面裂隙及渗透特性的变化特征。结果表明:随着超声波激励时长不断增加, 煤体微小孔、中孔、大孔的 T_2 谱峰面积变化率和总孔隙率变化率、表面裂隙面积变化率、渗透率变化率均呈线性增大关系; 超声波激励煤体 30~150 min, 微小孔、中孔、大孔的 T_2 谱峰面积变化率分别由 14.60%、52.50%、24.90% 增大至 61.30%、145.50%、235.70%; 总孔隙率变化率、表面裂隙面积变化率、渗透率变化率分别由 5.04%、47.27%、41.67% 增大至 24.93%、127.91%、208.33%。在不同超声波时长激励下, 煤体渗透率变化率与总孔隙率变化率、表面裂隙面积变化率均符合线性增大关系; 随着超声波激励时长增加, 煤体孔隙、裂隙改造效果提升, 渗透率得以提高。

【关键词】 超声波激励时长; 裂隙结构; 渗透特性; 核磁共振; 孔隙率

Effect of ultrasonic excitation time on pore and crack structure and permeability characteristics of coal

HAO Hejie¹, WANG Ruizhe¹, YANG Erhao², QIU Yue¹, ZHANG Xiaoying¹, LIN Haifei^{1,3}

(1 School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China; 2 College of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 6210103, China; 3 Western Coal Mine Gas Disaster Prevention and Control Key Laboratory of Shaanxi Higher Education Institutions, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: In order to explore the damage characteristics of coal under different ultrasonic excitation time, the ultrasonic excitation test system, nuclear magnetic resonance imaging system, stereo microscope and automatic permeability test system of coal core were used to analyze the changes of pore structure,

* 文章编号:1003-3033(2024)09-0154-10; 收稿日期:2024-03-10; 修稿日期:2024-06-21

** 通信作者:王瑞哲(1995—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,主要研究方向为煤层增透瓦斯治理。E-mail:819463680@qq.com。

surface crack and permeability characteristics of coal under different ultrasonic excitation time. The results show that with the increase of ultrasonic excitation time, the change rates of T2 spectral peak area, total porosity, surface fracture area and permeability of small, medium and large pores in coal are linearly increased. When the coal body is excited by ultrasonic for 30 to 150 min, the change rate of T2 peak area of micro, medium and large pores increase from 14.60%, 52.50% and 24.90% to 61.30%, 145.50% and 235.70%, respectively. The total porosity change rate, surface crack area change rate and permeability change rate increased from 5.04%, 47.27% and 41.67% to 24.93%, 127.91% and 208.33%, respectively. Under the excitation of different ultrasonic time, the change rate of permeability of the coal and the change rate of total porosity and the change rate of surface cracking area are in line with the linear increasing relationship, with the increase of ultrasonic excitation time, the pore and crack modification effect of coal is enhanced, and the permeability can be improved.

Keywords: ultrasonic excitation duration; fracture structure; permeability characteristics; nuclear magnetic resonance; porosity

0 引言

煤炭是我国的主体能源和能源压舱石,高效抽采并利用煤中伴生的瓦斯,可杜绝矿井瓦斯事故、减少温室气体排放、改善能源供应结构、推动双碳目标实现^[1],但是我国大多数的煤层渗透性较差,采用常规钻孔预抽瓦斯效率较低,需采用高效增透技术^[2]。超声波增透技术作为一种具有广阔应用前景的无水增透措施,可通过施加超声波改造煤层孔隙裂隙结构及渗透特性,从而提高瓦斯抽采效果^[3]。

近年来,国内学者围绕超声波增透煤体进行了大量研究。鲜学福等^[4]率先提出了可控声波处理煤岩体改善瓦斯渗透性的思想。康智鹏^[5]、田洪波^[6]、TANG Zongqing^[7]等探究了超声波作用下煤体微观孔隙、裂隙结构演化特征,表明超声波可损伤煤体,增加孔隙孔径、数量,增大孔隙率,形成裂隙网。林海飞等^[8]研究了脉冲超声波对煤体孔隙的影响机制,表明超声波可有效损伤煤体结构,改善孔隙分布。肖晓春^[9]、赵鑫^[10]等分析了超声波影响下煤体裂隙发育扩展特征,表明机械震碎作用可损伤煤体,贯通裂隙网络。于国卿^[11]、马会腾^[12]等研究了超声波功率、频率对煤体孔隙分布特征的影响,表明超声波可显著改善煤体孔隙结构,拓展瓦斯解吸通道。李树刚^[13-14]、YANG Erhao^[15]等发现增加超声波的功率可有效损伤煤基质,促使孔隙发育扩展,形成瓦斯运移网络,提高煤体渗透性。LIU Peng^[16]、李业^[17]等研究了不同超声波功率、时间下煤体孔隙与渗透率的变化特征,发现超声波功率、时间增加可提高煤体孔隙连通性,促进瓦斯解吸、扩散、渗流,并揭示了煤体损伤与瓦斯抽采机理。宋

超等^[18]探究了超声波激励对煤体微观结构的影响,揭示了机械振动可疏通封闭孔隙,形成次生裂隙,增大孔隙率,提高渗透率。姜永东等^[19]分析了声场对煤层渗透性的影响特性,结果表明距声场越近,渗透率提高越显著。王昌伟等^[20]研究了超声波激励时间下清洁压裂液改造煤岩的影响效果,表明超声波可改善煤体孔隙结构,提高渗透率,促进煤层瓦斯解吸。

综上所述:目前超声波增透煤体试验研究主要集中于功率、频率、煤阶等条件,实际上超声波增透煤体是能量累积损伤过程,其中,激励时长对煤体孔隙性及渗透性影响较大,还需进一步深入研究。鉴于此,笔者拟探究不同超声波激励时长作用对煤体孔隙结构及渗流特性的影响,通过设置不同激励时长,开展一系列超声波激励试验研究,对激励前后煤体孔隙度、表面裂隙宽度及渗透特性进行相关分析与讨论,以期揭示超声波激励下煤体损伤增透的时效性,为进一步深入研究超声波增透技术的适用性,指导煤层增透与瓦斯抽采工艺流程及现场应用提供理论依据。

1 不同时长激励煤体试验方法

1.1 煤样选取与制备

煤样采自河南省焦煤赵固二矿二₁煤层,为尽可能保证煤样原生结构与基本性能的同质性,降低非均质对试验结果的影响,选取煤层同一位置原煤并密封运回实验室。利用煤样取芯机、切割机、磨平机将其制成 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 圆柱型煤样,通过电子天平、游标卡尺、非金属波速检测仪等测量煤样质量、尺寸、波速,并筛选5个符合要求的煤样用于

试验,煤样基本参数见表1。

表1 煤样基本参数

Table 1 Basic parameters of coal sample

序号	质量/g	直径/mm	高度/mm	波速/(km·s ⁻¹)
1	283.1	50.0	100.0	1.869
2	280.3	50.0	100.3	1.784
3	282.1	50.2	100.2	1.897
4	281.2	49.9	100.1	1.772
5	282.4	50.0	100.8	1.945

1.2 不同时长超声波激励煤体试验方案

1.2.1 试验仪器

1) 超声波激励试验系统。该系统主要由超声波发生系统、换能器冷却系统、恒温水浴系统等组成^[16]。超声波发生系统包括超声波发生器和超声波换能器。换能器冷却系统主要由空气压缩机和油水分离器组成,可通过持续过滤压缩空气为换能器冷却降温。恒温水浴系统包括低温冷却液循环泵和双层循环结构水浴槽反应釜,控制超声波激励煤体过程的水浴温度(-15~50℃,±0.5℃)。

2) 煤体孔隙结构测试设备。煤体孔隙结构测试设备采用核磁共振成像系统,磁场强度(0.3±

0.05) A/m,主频率 12.8 MHz,工作温度 22~32℃,环境湿度 30%~70%。

3) 煤体裂隙结构测试设备。煤体裂隙结构测试设备使用体视显微镜,放大倍率 6.3~50 X,可选 2~250 X,变倍比 8:1。

4) 煤岩芯渗透率自动测试系统。煤岩芯渗透率自动测试系统主要由应力加载系统、三轴压力室、渗流测试系统、温度控制系统、抽真空系统、数据采集处理系统等组成^[15]。应力加载系统轴、围压 0~10 MPa,精度±0.5 MPa,加载速率 0~1 MPa/s;三轴压力室渗透压力 0~15 MPa,精度±0.5 MPa;温度控制系统水浴温度 20~100℃。煤体渗透率测试采用达西定律稳态法。

$$K_g = \frac{2P_0 Q_0 \mu L}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

式中: K_g 为煤岩渗透率,10⁻¹⁵ m²; Q_0 为气体流量,cm³/s; P_0 为大气压力,取 0.1 MPa; L 为煤岩高度,cm; A 为试件横截面积,cm²; μ 为气体动力黏度,MPa·s; P_1 为试件进气端气压,MPa; P_2 为试件出气端气压, $P_2 = P_0$,MPa。

1.2.2 试验步骤

试验步骤如图1所示。

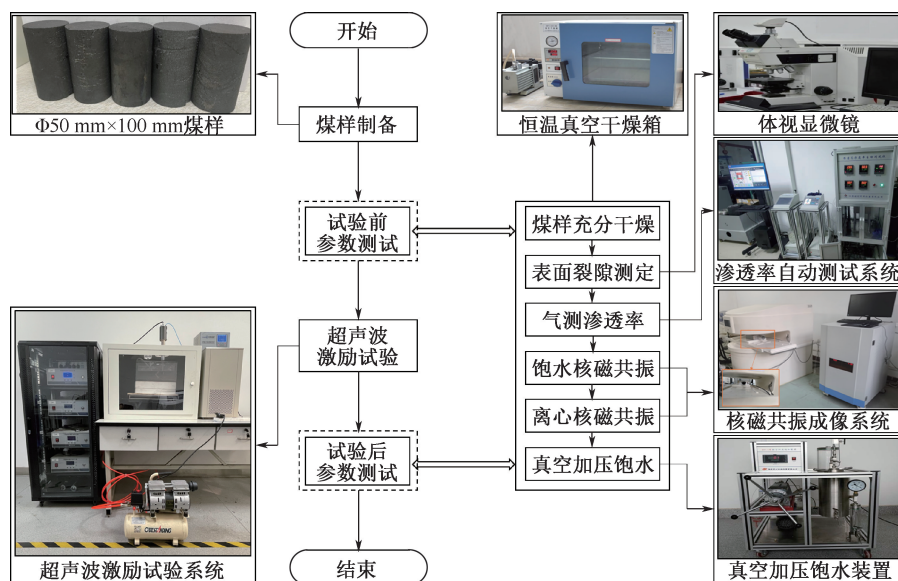


图1 试验步骤

Fig. 1 Test steps

1) 将煤样置于 40℃ 的恒温真空干燥箱中充分干燥至恒重(煤样质量变化不超过 0.1%)。

2) 利用体视显微镜测定煤样表面裂隙面积。

3) 利用渗透率自动测试系统测定煤样渗透率(设定温度、轴压、围压、进气端压力分别为 25℃、

0.5、4.0、1.0 MPa)。

4) 将煤样置于真空压力为-0.1 MPa 的真空加压饱水装置下抽气 2 h, 饱水至饱和, 并在常温常压下利用核磁共振成像系统测定饱水煤样孔隙结构, 然后置于岩石离心机中离心 90 min, 测定离心煤样

孔隙结构,获取饱水与离心煤样横向弛豫时间 T_2 谱图及孔隙率。

5) 对煤样真空加压饱水后,置于 25 °C 恒温水浴箱中,将功率 500 W、频率 20 kHz 的超声波探头垂直浸入液面 20 mm,固定于煤样顶端上方 30 mm 处,并开展 30、60、90、120 和 150 min 的超声波激励试验。

6) 重复步骤 2)~4) 获取不同超声波激励时长下煤样裂隙面积、渗透率、 T_2 谱图、孔隙率等参数。

1.3 核磁共振检测原理

1.3.1 T_2 谱图分析

核磁共振成像系统通过测试孔隙含氢流体在外加磁场下横向弛豫时间绘制 T_2 谱图,从而分析孔隙结构与流体分布信息变化特征^[21]。横向弛豫时间 T_2 与孔隙半径 r 关系可表示为:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S_p}{V} = F_s \frac{\rho}{r} \quad (2)$$

式中: T_2 为横向弛豫时间,ms; ρ 为横向表面弛豫率, $\mu\text{m}/\text{ms}$; S_p 为孔隙表面积, μm^2 ; V 为孔隙体积, μm^3 ; r 为孔隙半径, μm ; F_s 为几何形状因子。通常认为煤体孔隙多为圆柱形, ρ 取 0.05 $\mu\text{m}/\text{ms}$, F_s 取 2。

1.3.2 孔隙率测定

结合饱水—离心联测法^[22]可知:

$$\varphi_e = \varphi_t \cdot \frac{\text{FFI}}{\text{BVI} + \text{FFI}} \quad (3)$$

$$\varphi_r = \varphi_t \cdot \frac{\text{BVI}}{\text{BVI} + \text{FFI}} \quad (4)$$

式中: φ_t 为煤体总孔隙率,%; φ_e 为煤体有效孔隙率,%; φ_r 为煤体残余孔隙率,%; FFI (Free Fluid Index) 为自由流体系数;BVI (Bulk Volume Index) 为束缚流体系数;FFI+BVI 为全部流体由饱水煤体 T_2 谱面积分数计算得出。

2 激励时长对煤体孔隙性的影响

2.1 不同超声波激励时长下煤体孔隙结构变化

2.1.1 T_2 谱图与孔径分布变化特征

为分析不同超声波激励时长下饱水态与离心态煤体孔隙结构变化情况,通过不同孔隙内水分子¹H 质子分布反演获取核磁共振测试数据,依据 B. B. 霍多特分类法^[23],文中采用固定 T_2 值(以 1、10、100 ms 为划点)对煤体孔径进行划分,将孔分为微小孔、中孔和大孔,绘制不同超声波激励时长下煤体核磁共振 T_2 谱图,如图 2 所示。

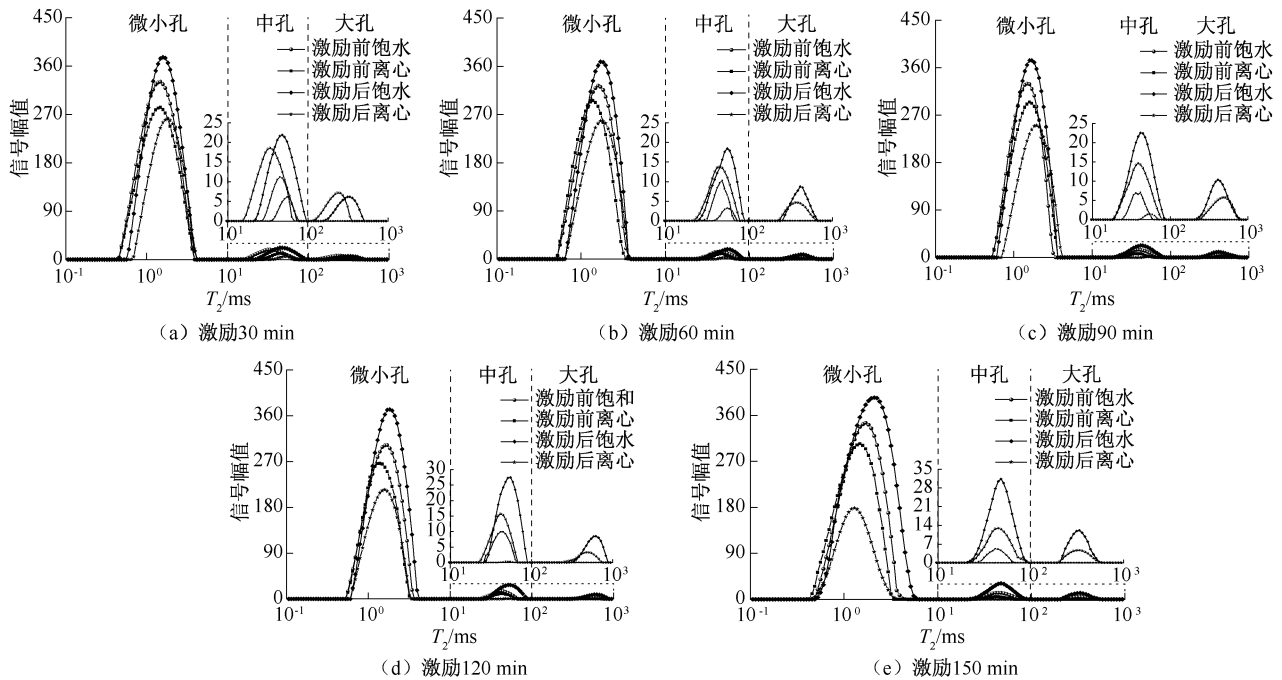


图 2 不同超声波激励时长下煤体核磁共振 T_2 谱图

Fig. 2 Nuclear magnetic resonance T_2 spectra of coal under different ultrasonic excitation time

由图 2 可知:经不同超声波时长激励后,饱水煤体 T_2 谱各峰区间宽度与信号幅值较激励前均有所

增加,离心煤体 T_2 谱各峰区间宽度与信号幅值较激励前均有所减小, T_2 谱峰区间宽度增加表明孔隙孔

径扩展, T_2 谱峰信号幅值升高表明孔隙数量增加, 整体表现为超声波激励时长增加, 饱水煤体 T_2 谱峰面积增大, 离心煤体 T_2 谱峰面积减小。

通过 T_2 谱图面积及其变化率(下式)可分析超声波激励时长对煤体孔隙结构的影响特征, 如图3所示(T 为超声波不同激励时长, min)。

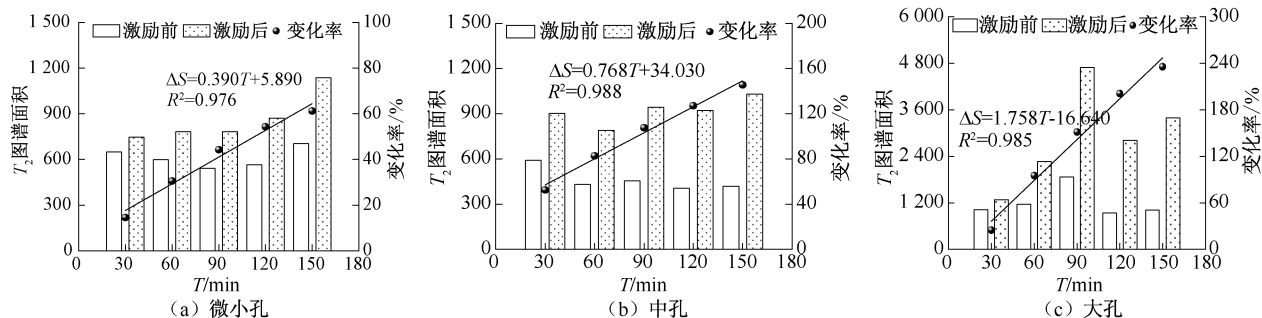


图3 不同超声波激励时长下饱水煤体 T_2 谱图面积变化

Fig. 3 Changes in T_2 spectral area of saturated coal under different ultrasonic excitation time

由图3可知:激励30~150 min时,微小孔、中孔、大孔的 T_2 谱图面积变化量和变化率分别为95~432、310~611、255~2381和14.60%~61.30%、52.50%~145.50%、24.90%~235.70%,且各 T_2 谱图面积变化率与激励时长均符合线性增长关系。这是由于超声波激励时长增加,超声空化、机械振动效应持续形成,煤体吸收能量不断累积,孔隙结构损伤发育,孔隙大小与数量逐渐增长。

2.1.2 不同超声波激励时长下煤体孔隙率变化特征

孔隙率是表征煤体孔隙结构发育程度的重要指标,其大小直接影响着煤层渗透性。由于篇幅所限,为分析不同超声波激励时长下煤体孔隙率变化特征,仅绘制了超声波激励30和150 min前后煤体饱水态与离心态孔隙率分量和累积孔隙率,如图4所示。

由图4可知:超声波激励时长增加时,饱水态煤体 T_2 谱图宽度与孔隙率分量幅值及累积孔隙率较激励前均有所增大,离心态煤体 T_2 谱图宽度与孔隙率分量幅值及累积孔隙率较激励前均有所减小,且自由流体空间占比增多、束缚流体空间占比减少。如激励150 min时,饱水态孔隙率分量第1峰 T_2 最大宽度由4.076 ms增至5.486 ms、峰值由0.185%增至0.198%,第2峰 T_2 最大宽度由66.855 ms增至69.345 ms、峰值由0.007%增至0.016%,第3峰 T_2 最大宽度由336.680 ms增至375.616 ms、峰值由0.003%增至0.006%;饱水态累积孔隙率由3.37%增至4.21%;离心态累积孔隙率由2.86%减至

$$\Delta S = \frac{S_{ij} - S_0}{S_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: ΔS 为 T_2 谱图面积变化率,%; S_0 为超声波激励前 T_2 谱图面积; S_{ij} 为超声波激励后 T_2 谱图面积; i 为各孔隙; j 为超声波激励时长, min。

2.20%。这是由于超声波激励时长增加,导致煤体进一步损伤破坏,微小孔隙逐渐转化为中大孔隙,更多封闭/半封闭孔隙打开串联,促使煤体孔隙连通程度逐渐增强。

为进一步探究超声波激励时长对煤体孔隙分布的影响特征,分析孔隙率变化量及变化率(式(6))与激励时长的关系,如图5、图6所示。

$$\varphi = \frac{\Phi_1 - \Phi_0}{\Phi_0} \quad (6)$$

式中: φ 为孔隙率变化率,%; Φ_0 为超声波激励前孔隙率,%; Φ_1 为超声波激励后孔隙率,%。

由图5和图6可知:超声波激励时长增加时,煤体总孔隙率、有效孔隙率增大,残余孔隙率减小,且总孔隙率变化率、有效孔隙率变化率均与激励时长符合线性增长关系,残余孔隙率变化率与激励时长符合线性减小关系。如激励30~150 min时,总孔隙率变化率为5.04%~24.93%,有效孔隙率变化率为35.29%~294.12%,残余孔隙率变化率为-23.08%~-0.35%。这是由于超声波激励时长增加,煤体孔隙结构发育演化并相互联通,促使自由流体空间占比增多,束缚流体空间占比减少,总孔隙率增大。

2.2 不同超声波激励时长下煤体裂隙结构演化

煤体裂隙结构作为主要瓦斯运移通道,其变化直接影响煤体渗透性。为探究不同超声波激励时长下煤体表面裂隙演化特征,利用体视显微镜放大相同倍率观测煤体表面裂隙,并使用AxioVision软件分析煤体表面裂隙面积变化情况,如图7所示。

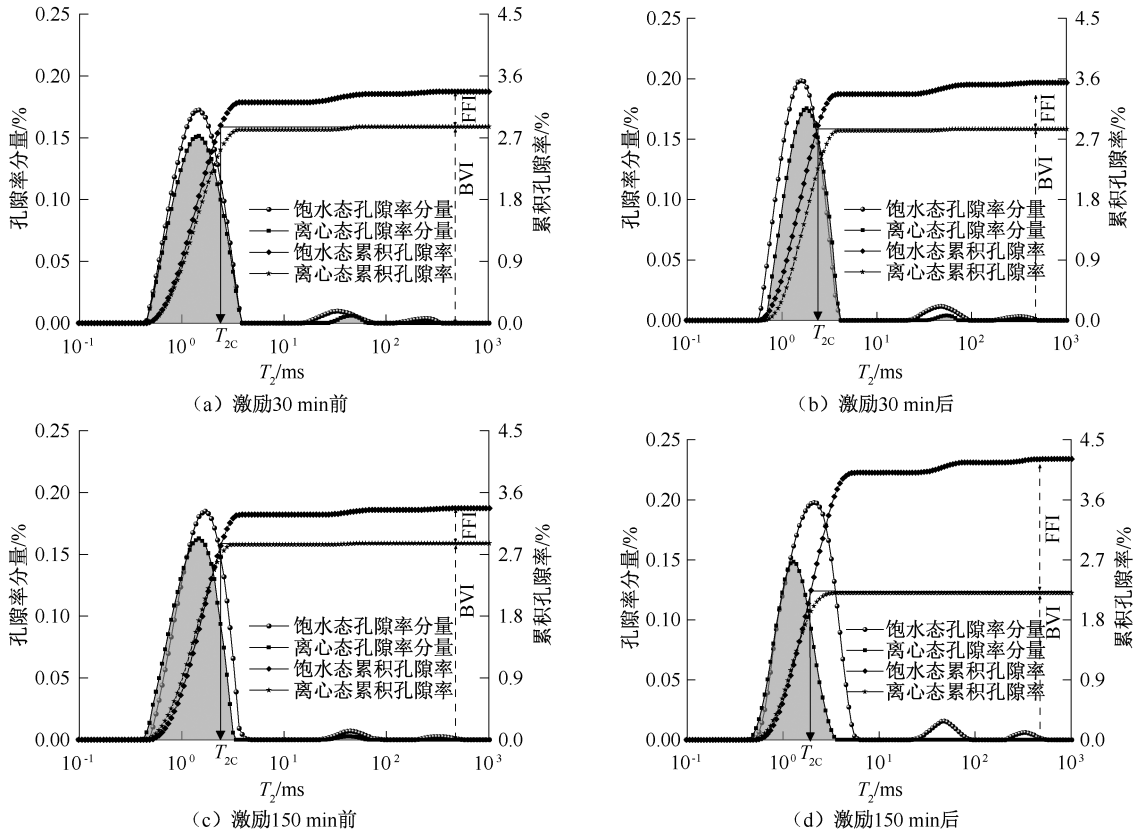


图 4 不同超声波激励时长下饱水态与离心态煤体孔隙率分量与累积孔隙率变化

Fig. 4 Changes in porosity components and cumulative porosity of coal in saturated and detached states under different ultrasonic excitation time

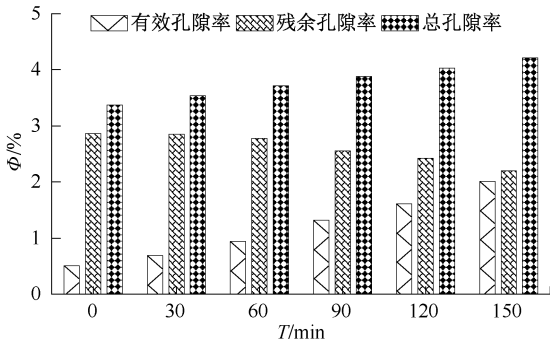


图 5 不同超声波激励时长下煤体孔隙率变化

Fig. 5 Coal porosity changes under different ultrasonic excitation time

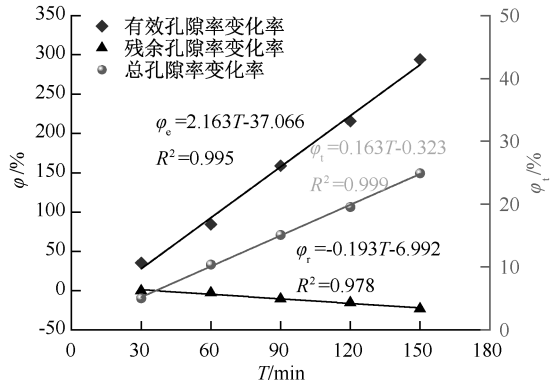


图 6 不同超声波激励时长下煤体孔隙率变化率拟合曲线

Fig. 6 Fitted curves of the rate of changes of coal porosity under different ultrasonic excitation time

由图 7 可知:激励前煤样表面裂隙较少、发育程度较小,激励后煤体表面裂隙宽度与长度扩展延伸,裂隙面积大幅提高,表明超声波激励时长增加时,煤体裂隙结构发育演化,表面裂隙面积增长扩大。如激励 30 min 后表面裂隙面积由 0.55 mm² 增至 0.81 mm²,激励 150 min 后表面裂隙面积由 0.43 mm² 增至 0.98 mm²。

由于煤样表面裂隙存在初始差异性,无法通过绝对值变化探究超声波激励时长对煤体裂隙结构的

影响特征,故采用表面裂隙面积变化率表征不同超声波激励时长下煤体表面裂隙演化程度,如图 8 所示。表面裂隙面积变化率计算过程如下:

$$V = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \times 100\% \quad (7)$$

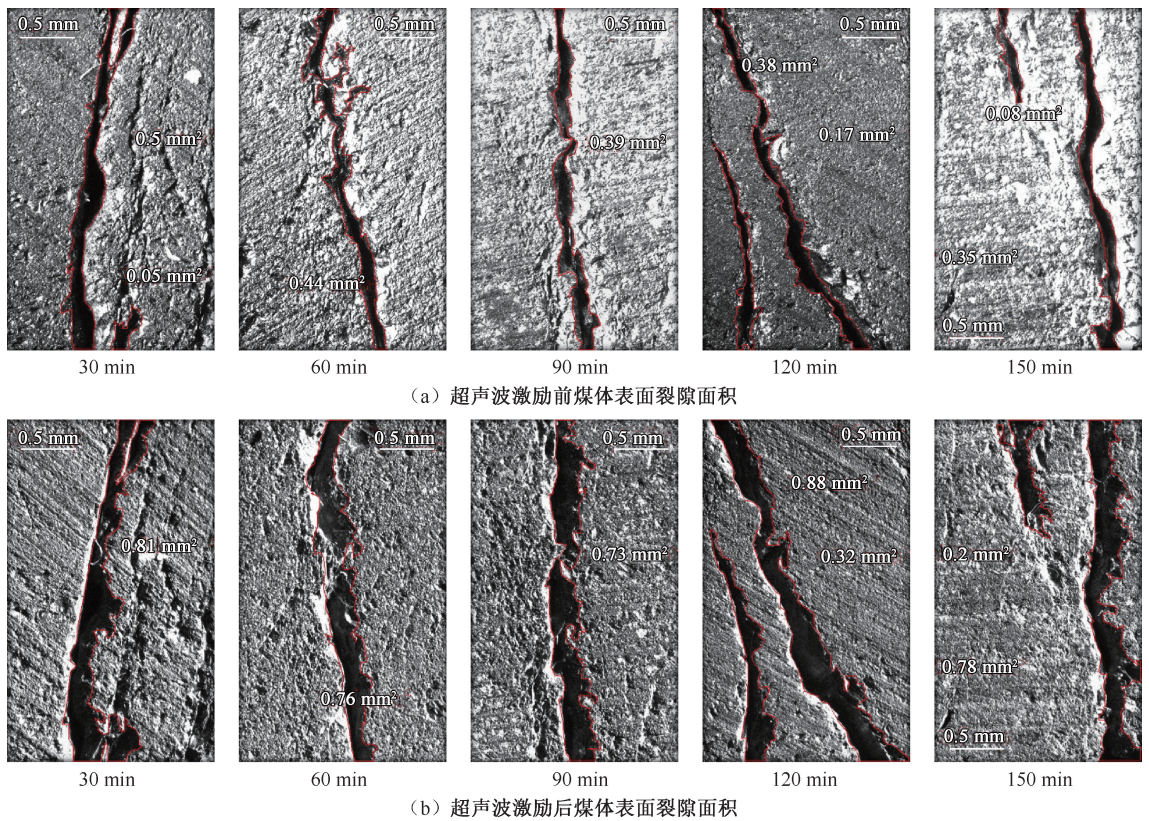


图 7 不同超声波激励时长下煤体表面裂隙面积变化

Fig. 7 Changes in surface fracture area of coal under different ultrasonic excitation time

式中: V 为表面裂隙面积变化率, %; S_0 为超声波激励前表面裂隙面积, mm^2 ; S_1 为超声波激励后表面裂隙面积, mm^2 。

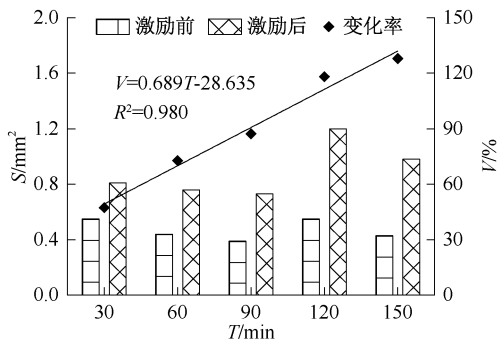


图 8 不同超声波激励时长下煤体表面裂隙面积变化率

Fig. 8 Coal surface fracture area change rate under different ultrasonic excitation time

由图 8 可知: 超声波激励时长增加, 煤体表面裂隙面积增大, 且其变化率与激励时长符合线性增长关系。如激励 30 min 后表面裂隙面积变化率为 47.27%; 激励 150 min 后表面裂隙面积变化率为 127.91%, 是激励 30 min 的 2.71 倍。这是由于超声波激励时长增加时, 能量累积效应使煤体裂隙产生

持续性演化影响, 当累积能量大于煤体强度阈值时, 煤体损伤破裂, 原生裂隙拓展、次生裂隙发育, 并相互贯通, 形成丰富的裂隙网络空间。

3 激励时长对煤体渗透特性的影响

3.1 不同超声波激励时长下煤体渗透率变化特征

渗透率变化情况可反映煤体孔隙性演化对渗透性改善的影响程度, 故采用渗透率变化率可分析超声波激励时长对煤体渗透性的作用情况, 如图 9 所示。渗透率变化率计算过程如下:

$$\delta = \frac{K_1 - K_0}{K_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中: δ 为渗透率变化率, %; K_0 为超声波激励前渗透率, 10^{-15}m^2 ; K_1 为超声波激励后渗透率, 10^{-15}m^2 。

由图 9 可知: 随着超声波激励时长增加, 煤体渗透率显著提高, 且其变化率与激励时长符合线性增长关系。如激励 30 min 后, 煤体渗透率由 $0.012 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 增至 $0.017 \times 10^{-15} \text{m}^2$, 变化率为 41.67%; 激励 150 min 后, 煤体渗透率由 $0.012 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 增至 $0.037 \times 10^{-15} \text{m}^2$, 变化率为 208.33%, 是激励 30 min 的 5.00 倍。

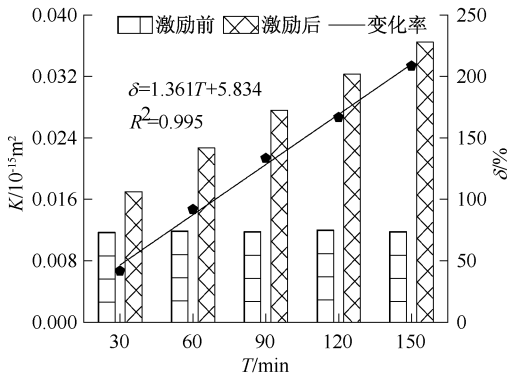


图9 不同超声波激励时长下煤体渗透率变化率

Fig. 9 Coal permeability change rate under different ultrasonic excitation time

3.2 煤体损伤参数与渗透特性关系分析

不同时长超声波激励煤体前后,煤体损伤参数与渗透特性存在一定的相关性。为得出不同时长超声波激励前后煤体总孔隙率变化率、表面裂隙面积变化率与渗透率变化率之间的关系,以总孔隙率变化率、表面裂隙面积变化率为横轴,渗透率变化率为纵轴绘制煤体损伤参数与渗透特性关系如图10所示。

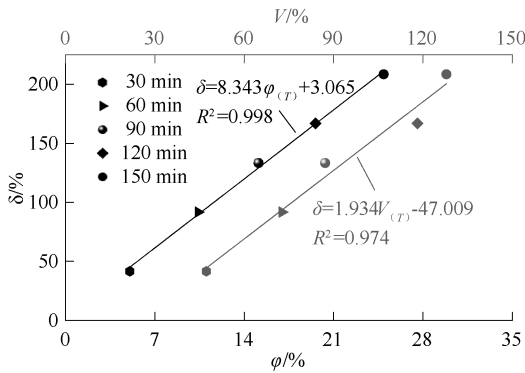


图10 总孔隙率变化率、表面裂隙面积变化率与渗透率变化率关系

Fig. 10 Relationship between total porosity change rate, surface fracture area change rate and permeability change rate

由图10可知:不同超声波激励时长下,煤体渗透率变化率随总孔隙率变化率、表面裂隙面积变化率不断增长而递增,且均符合线性增长关系,采用拟合和回归分析相结合的方法,相关性均在0.974以上。超

声波激励时长从30 min增至150 min时,总孔隙率变化率、表面裂隙面积变化率从5.04%、47.27%增至24.93%、127.91%,渗透率变化率从41.67%增至208.33%,超声波激励作用下,煤体总孔隙率、表面裂隙面积的增大有助于提高煤层渗透率。

煤作为双重孔隙的多孔介质,由于其内部存在水介质,当超声波在煤中传播时,容易产生空化效应、机械效应、热效应等现象。当部分声能转化为其他能量时,煤中水介质压强、密度等发生循环式波动,并在介质内部与界面形成空化气泡^[24]。空化气泡凭借超声波辐射作用发生震荡、膨胀、收缩,并持续聚集吸收能量。随着超声波激励时长增加,空化气泡累积能量达到阈值时,气泡内部高温高压远大于空腔与水介质界面温度与压力,促使空化气泡溃灭,累积能量瞬间释放,局部温度、压力显著提高^[25],导致煤基质持续受到冲击碰撞,不断产生疲劳损伤。同时,机械效应导致煤体发生撕裂破坏作用,促使薄弱处孔壁面不断破碎,煤基质颗粒逐渐剥离,内部孔隙发育演化,表面裂隙拓展延伸,并相互串联贯通形成孔裂隙网络空间^[26]。

4 结论

1) 煤体在不同时长超声波激励作用下,煤体孔裂隙扩展,煤体总孔隙率变化率为5.04%~24.93%;表面裂隙面积变化量及变化率为0.26~0.55 mm²、47.27%~127.91%;随超声波激励时长增加,煤体T₂谱图面积、总孔隙率、有效孔隙率、表面裂隙面积变化量及变化率均符合正线性关系,残余孔隙率变化量及变化率符合负线性关系。

2) 超声波激励30~150 min时,煤体渗透率变化量及变化率为0.005×10⁻¹⁵~0.025×10⁻¹⁵ m²、41.67%~208.33%,激励150 min的渗透率变化量及变化率是激励30 min的5.0倍;随超声波激励时长增加,煤体渗透率变化量及变化率符合正线性关系。

3) 不同超声波激励时长下,煤体渗透率变化率与总孔隙率变化率、表面裂隙面积变化率均符合线性增长关系,随超声波激励时长不断增加,促使煤体能量持续性累积,导致煤基质破碎断裂,孔裂隙扩展贯通,渗透率有效提高。

参考文献

[1] 李树刚,张静非,尚建选,等. 双碳目标下煤气同采技术体系构想及内涵[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4):

- 1 416-1 429.
- LI Shugang, ZHANG Jingfei, SHANG Jianxuan, et al. Conception and connotation of coal and gas co-extraction technology system under the goal of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(4): 1 416-1 429.
- [2] 黄中伟, 李国富, 杨睿月, 等. 我国煤层气开发技术现状与发展趋势[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(9): 3 212-3 238. HUANG Zhongwei, LI Guofu, YANG Ruiyue, et al. Review and development trends of coalbed methane exploitation technology in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3 212-3 238.
- [3] YANG Wei, WANG Liang, WANG Hao, et al. Ultrasonic-assisted coalbed methane recovery: a coupled acoustic-thermal-mechanical-hydrological model[J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(6): 4 293-4 307.
- [4] 易俊, 姜永东, 鲜学福, 等. 声场促进煤层气渗流的应力-温度-渗流压力场的流固动态耦合模型[J]. *岩土力学*, 2009, 30(10): 2 945-2 949, 2 960. YI Jun, JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, et al. A liquid-solid dynamic coupling model of ultrasound enhanced coalbed gas desorption and flow [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 2 945-2 949, 2 960.
- [5] 康智鹏. 超声波激励下煤体微观结构精细表征及解吸渗流特性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021. KANG Zhipeng. Study on microstructure fine characterization and desorption and seepage characteristics of coal body under ultrasonic incentive [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [6] 田洪波, 蒋曙光, 李玥, 等. 功率声波激励下无烟煤孔隙变化及裂隙发育研究[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(8): 9-12. TIAN Hongbo, JIANG Shuguang, LI Yue, et al. Study on anthracite pores variation and fractures development under acoustic power excitation[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(8): 9-12.
- [7] TANG Zongqing, ZHAI Cheng, ZOU Quanle, et al. Changes to coal pores and fracture development by ultrasonic wave excitation using nuclear magnetic resonance[J]. *Fuel*, 2016, 186: 571-578.
- [8] 林海飞, 仇悦, 王瑞哲, 等. 多级脉冲超声波激励含水煤体瓦斯解吸特征的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(3): 1 403-1 413. LIN Haifei, QIU Yue, WANG Ruizhe, et al. Experimental study on gas desorption characteristics of hydrous coal by multistage pulsed ultrasonic excitation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(3): 1 403-1 413.
- [9] 肖晓春, 潘一山, 吕祥锋, 等. 超声激励低渗煤层甲烷增透机理[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1 726-1 733. XIAO Xiaochun, PAN Yishan, LYU Xiangfeng, et al. Mechanism of methane permeability enhance through ultrasonic irradiating on low permeable coal seam [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 1 726-1 733.
- [10] 赵鑫, 肖晓春, 潘一山, 等. 超声机械效应致裂煤岩增渗规律研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(5): 151-157. ZHAO Xin, XIAO Xiaochun, PAN Yishan, et al. Research on permeability enhancement laws of coal fracturing by ultrasound mechanical effect[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(5): 151-157.
- [11] 于国卿, 翟成, 秦雷, 等. 超声波功率对煤体孔隙影响规律研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(2): 264-270, 322. YU Guoqing, ZHAI Cheng, QIN Lei, et al. Changes to coal pores by ultrasonic wave excitation of different powers[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(2): 264-270, 322.
- [12] 马会腾. 超声波激励对煤体官能团及孔隙结构的影响[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. MA Huiteng. Effect of ultrasonic excitation on functional groups and pore structures of coal [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [13] 李树刚, 王瑞哲, 林海飞, 等. 超声波功率对煤体孔隙结构损伤及渗流特性影响实验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2): 396-404. LI Shugang, WANG Ruizhe, LIN Haifei, et al. Experimental study on the influence of ultrasonic power on coal pore structure damage and seepage characteristics[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(2): 396-404.
- [14] 李树刚, 王瑞哲, 林海飞, 等. 超声波功率对煤体损伤特性及能量演化规律的试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 283-294. LI Shugang, WANG Ruizhe, LIN Haifei, et al. Experimental study on damage characteristics and energy evolution of coal by ultrasonic power[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 283-294.
- [15] YANG Erhao, LIN Haifei, LI Shugang, et al. Characteristic strength and energy evolution law of coal treated by ultrasonic wave with different power under uniaxial compression [J]. *Natural Resources Research*, 2022, 31: 913-928.
- [16] LIU Peng, LIU Ang, ZHONG Fangxiang, et al. Pore/fracture structure and gas permeability alterations induced by ultrasound treatment in coal and its application to enhanced coalbed methane recovery[J]. *Journal of Petroleum Science*

and Engineering, 2021, 205; DOI:10.1016/j.petrol.2021.108862.

- [17] 李业. 声场作用下煤结构演化机制及煤层气渗流规律的实验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
LI Ye. Experimental Study on the evolution mechanism of coal structure and the seepage law of CBM under sound field [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [18] 宋超, 姜永东, 王苏健, 等. 超声波作用下煤体微观结构的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5):139-144.
SONG Chao, JIANG Yongdong, WANG Sujian, et al. Experimental study on micro-structure of coal by ultrasonic treatment [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5):139-144.
- [19] 姜永东, 李业, 崔悦震, 等. 声场作用下煤储层渗透性试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增1):154-159.
JIANG Yongdong, LI Ye, CUI Yuezhen, et al. Experimental study on characteristics of coal reservoir permeability under acoustic wave[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1):154-159.
- [20] 王昌伟, 左少杰, 李希建, 等. 超声波作用时间对清洁压裂液改造煤岩效果的影响[J/OL]. 采矿与安全工程学报:1-12. [2024-03-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1760.TD.20230920.1024.002.html>.
WANG Changwei, ZUO Shaojie, LI Xijian, et al. Effect of ultrasonic action time on coal transformation by clean fracturing fluid [J/OL]. Journal of Mining & Safety Engineering:1-12. [2024-03-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1760.TD.20230920.1024.002.html>.
- [21] 翟成, 孙勇, 范宜仁, 等. 低场核磁共振技术在煤孔隙结构精准表征中的应用与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2):828-848.
ZHAI Cheng, SUN Yong, FAN Yiren, et al. Application and prospect of low-field nuclear magnetic resonance technology in accurate characterization of coal pore structure[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2):828-848.
- [22] 杨明, 柳磊, 张学博, 等. 不同阶煤孔隙结构与流体特性的核磁共振试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1):81-88.
YANG Ming, LIU Lei, ZHANG Xuebo, et al. Nuclear magnetic resonance experimental study on pore structure and fluid characteristics of coal at different ranks[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(1):81-88.
- [23] 姚艳斌, 刘大锰. 基于核磁共振弛豫谱技术的页岩储层物性与流体特征研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1):181-189.
YAO Yanbin, LIU Dameng. Petrophysical properties and fluids transportation in gas shale: a NMR relaxation spectrum analysis method[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1):181-189.
- [24] 王云刚, 杨廷廷, 王琼洋, 等. 煤样中超声波传播特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(12):68-73.
WANG Yungang, YANG Tingting, WANG Qiongyang, et al. Study on propagation characteristics of ultrasonic wave in coal[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(12):68-73.
- [25] 于永江, 张春会, 王来贵. 超声波干扰提高煤层气抽放率的机理[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2008, 27(6):805-808.
YU Yongjiang, ZHANG Chunhui, WANG Laigui. Mechanism of ultrasonic interference to increase the rate of CBM[J]. Journal of Liaoning Technical University:Natural Science,2008, 27(6):805-808.
- [26] 葛兆龙, 卢义玉, 周东平, 等. 空化水射流声震效应促进瓦斯解吸实验的规律及机理研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7):1150-1155.
GE Zhaolong, LU Yiyu, ZHOU Dongping, et al. Study on regular and mechanism of coal bed methane desorption experiment under sonic vibrating of cavitation water jets[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7):1150-1155.

作者简介: 郝荷杰 (1999—),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向为煤与瓦斯安全共采、煤矿瓦斯防治等。E-mail:1418749631@qq.com。

