

中文引用格式:张笑盈,林海飞,严敏,等. 超声波对煤中瓦斯放散动力学影响的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(3): 153-161.

英文引用格式: ZHANG Xiaoying, LIN Haifei, YAN Min, et al. Experimental study on influence of ultrasonic stimulation on kinetic characteristics of gas diffusion in coal[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(3): 153-161.

超声波对煤中瓦斯放散动力学影响的试验研究^{*}

张笑盈¹, 林海飞^{**1, 2}教授, 严敏^{1, 2}教授, 王瑞哲¹, 仇悦¹, 周行¹

(1 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2 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: X936

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.0456

基金项目: 国家自然科学基金资助(52174207); 国家杰出青年科学基金资助(52425405)。

【摘要】 为进一步探究超声波激励煤中瓦斯放散效应, 利用含瓦斯煤体超声波激励试验系统, 分析不同超声波激励条件(功率 G 、频率 F 和时间 T)作用后煤中瓦斯放散量变化特征, 基于类朗缪尔模型、准一级动力学模型及瓦斯动扩散模型等, 分析超声波激励对瓦斯放散动力学特性的影响。结果表明: 超声波功率增大、频率升高或激励时间延长均可增大瓦斯放散量; 超声波功率由 250 W 增大至 1 000 W 时, 瓦斯放散量由 0.689 mL/g 增加到 0.981 mL/g, 放散率由 5.92% 提高到 10.69%; 煤中瓦斯放散量相较于超声波频率 20 kHz 的 0.739 mL/g 增加到 40 kHz 的 1.074 mL/g, 放散率由 6.36% 提高到 9.65%; 激励时间 30 min 时煤中瓦斯放散量 0.833 mL/g 增加到 120 min 的 1.100 mL/g, 放散率由 8.50% 提高到 12.65%。瓦斯动扩散模型最符合超声波激励后煤中瓦斯放散特征, 类朗缪尔模型和准一级动力学模型次之。瓦斯初始扩散系数 D_0 及其衰减系数 β 在超声波激励下变化趋势相同, 均与超声波功率、频率和激励时间呈指数型正相关关系。超声波激励通过机械振动效应与孔隙清洁作用改善煤的孔隙连通性, 从而提高煤中瓦斯放散动力学特性。

【关键词】 超声波激励; 瓦斯放散; 动力学模型; 瓦斯动扩散模型; 扩散系数

Experimental study on influence of ultrasonic stimulation on kinetic characteristics of gas diffusion in coal

ZHANG Xiaoying¹, LIN Haifei^{1, 2}, YAN Min^{1, 2}, WANG Ruizhe¹, QIU Yue¹, ZHOU Xing¹

(1 College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China; 2 Key Laboratory of Western Mine Gas Hazard Prevention of Colleges and Universities in Shaanxi Province, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: To further investigate the effect of ultrasonic stimulation on gas diffusion in coal, this study utilized an ultrasonic stimulation test system for gas-bearing coal to analyze variations in gas diffusion under different ultrasonic conditions. Based on the Langmuir-like model, Quasi-first-order kinetic model, and gas dynamic diffusion model, the influence of ultrasonic stimulation on the kinetic characteristics of gas diffusion was systematically examined. Results demonstrate that increased ultrasonic power, elevated

* 文章编号: 1003-3033(2026)03-0153-09; 收稿日期: 2025-11-10; 修稿日期: 2026-01-10

** 通信作者: 林海飞(1979—), 男, 山西天镇人, 博士, 教授, 主要从事煤与瓦斯共采方面的研究。E-mail: lhaifei@163.com。

frequency, or prolonged stimulation time significantly enhance gas diffusion. Specifically, when ultrasonic power increases from 250 W to 1 000 W, gas diffusion rises from 0.689 mL/g to 0.981 mL/g, with the diffusion rate increasing from 5.92% to 10.69%. Similarly, gas diffusion escalates from 0.739 mL/g at 20 kHz to 1.074 mL/g at 40 kHz, elevating the diffusion rate from 6.36% to 9.65%. Extending stimulation time from 30 min to 120 min boosts gas diffusion from 0.833 mL/g to 1.100 mL/g, increasing the diffusion rate from 8.50% to 12.65%. The gas dynamic diffusion model exhibits the strongest fit for describing gas diffusion behavior under ultrasonic stimulation, followed by the Langmuir-like and Quasi-first-order kinetic models. Both the initial gas diffusion coefficient D_0 and its attenuation coefficient β demonstrate identical trends under ultrasonic stimulation, showing exponential positive correlations with ultrasonic power, frequency, and stimulation time. Ultrasonic stimulation enhances the kinetic characteristics of gas diffusion in coal by improving pore connectivity through mechanical vibration and pore-cleaning effects.

Keywords: ultrasonic stimulation; gas diffusion; kinetic model; dynamic gas diffusion model; diffusion coefficient

0 引言

瓦斯抽采可有效保障煤矿安全生产、保护大气环境及优化能源结构^[1-2],但我国大部分煤层渗透率较低,煤层瓦斯预抽效果不甚理想^[3-4]。因此,需实施煤层增透技术促进瓦斯解吸、扩散、运移^[5-6]。超声波激励作为一种操作便捷、无污染、低损耗及适用性强的煤层增透技术,对促进煤层瓦斯预抽效果具有重要意义。

煤中瓦斯放散特征参数对预测煤层钻孔瓦斯预抽采效果影响较大^[7-8]。目前,学者们针对瓦斯放散过程开展了大量研究。薛伟超^[9]搭建原位瓦斯放散初速度测定装置,可真实反映煤矿井下发生突出危险性程度。富向等^[10]揭示变质煤孔隙发育规律与瓦斯放散特性间关系。安丰华等^[11-12]研究发现,煤中瓦斯放散特性主要受煤内微孔发育影响,并基于孔径变化,分析煤粒内部瓦斯扩散行为以过渡型扩散为主。薛洪来等^[13]通过数学方法分析经验模型与动态模型间关系。刘彦伟等^[14-16]综合探究多种因素对瓦斯放散特征的影响机制,建立更符合实际的煤粒瓦斯放散动力学物理-数学模型。李志强^[17-18]、张迪^[19]等揭示煤层瓦斯串联多尺度渗流机制,实现多尺度渗透率的微观区分与宏观联合。现有超声波增透技术相关研究已明确声波对瓦斯解吸、渗流的促进作用。ZHANG Jie 等^[20]从气体分子振动角度解释超声波可抑制瓦斯吸附、促进瓦斯解吸。SUN Yong 等^[21]构建煤体孔隙-裂隙网络模型,证明超声波激励后煤体孔裂隙结构改善。李树刚等^[22]研究发现,超声波激励能有效劣化煤体内部孔

裂隙进而提高煤体渗透率。以上研究较多分析多因素对瓦斯放散及超声波对煤的作用效果,而对超声波激励后煤中瓦斯放散特性变化考虑较少。

因此,笔者拟利用含瓦斯煤体超声波激励试验系统,开展不同超声波激励条件作用后煤中瓦斯放散试验,并引入相关动力学模型分析煤中瓦斯放散动力学特征,探究超声波激励后煤中瓦斯放散特性变化,以期对超声波激励增透煤层技术理论的完善及现场工程应用提供一定理论依据。

1 超声波激励煤体试验方案

1.1 煤样采集及制备

试验煤样采自陕西某矿烟煤,为减少煤样非均质性对试验结果的影响,选取同一煤块且物性接近的煤样,尽可能保留煤样原生结构及基本性能一致。经过钻取、切割和打磨,将其制成 $\Phi 36\text{ mm}\times 86\text{ mm}$ 的圆柱体煤样,通过电子天平、游标卡尺、非金属波速检测仪等分别测量煤样质量、尺寸、波速,筛选 11 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

组号	质量/g	直径/mm	高度/mm	波速/(km·s ⁻¹)
0	111.5	36.0	86.1	1.706
1	105.9	36.0	86.0	1.693
2	101.9	35.8	85.9	1.589
3	108.3	36.0	86.0	1.654
4	108.2	36.0	86.0	1.667
5	107.5	36.0	86.0	1.617
6	107.3	36.0	86.0	1.604

续表 1

组号	质量/g	直径/mm	高度/mm	波速/(km·s ⁻¹)
7	104.8	36.0	86.0	1.667
8	111.7	36.1	86.2	1.706
9	109.7	36.0	86.0	1.680
10	108.2	36.0	86.0	1.629

1.2 超声波激励煤体试验仪器设备

试验采用含瓦斯煤体超声波激励试验系统测试

超声波激励后煤中瓦斯放散参数。该试验系统主要由超声波发生、瓦斯吸附放散、循环恒温及数据采集等模块组成,如图 1 所示。该试验系统可模拟煤中瓦斯吸附放散过程,持续提供额定功率 0~1 000 W,频率 20、28、35、40 kHz 的超声波并实时采集气体压力、流量等数据,满足不同超声波激励条件对煤及瓦斯物理特性的改造需求。

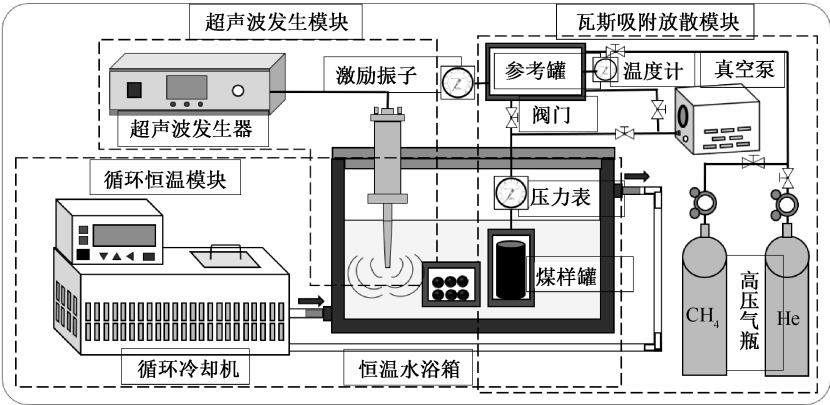


图 1 含瓦斯煤体超声波激励试验系统
Fig. 1 Ultrasonic stimulation test system for gas-bearing coal

1.3 试验步骤

- 1) 干燥煤样。将煤样在 343 K 恒温真空干燥箱中充分干燥至恒重(前后测量煤样质量差值小于 0.1%)。
- 2) 煤样瓦斯吸附试验。使试验系统保持恒温 293 K,煤样罐、参考罐及试验管路真空脱气后,向参考罐充入甲烷,待气体温度和压力稳定后记录气体压力 P_1 ,Pa;使参考罐与煤样罐联通,2 h 内气体压力不变视为煤中瓦斯吸附平衡,记录平衡时气体压力 P_2 ,Pa,确定煤中瓦斯吸附量。
- 3) 超声波激励煤中瓦斯解吸试验。开展不同超声波功率、频率和激励时间下的含瓦斯煤体解吸试验,解吸时间 120 min,实时监测煤中瓦斯解吸量,具体试验方案见表 2。

4) 超声波激励后煤中瓦斯放散试验。将参考罐作为瓦斯放散空间,罐内压力调节至-0.1 MPa,连通参考罐与煤样罐,实时记录气体压力 P_3 ,Pa,探究超声波激励后煤中瓦斯放散特性的变化特征。

1.4 试验数据处理

煤中瓦斯吸附量及放散量计算见下式:

$$Q_x = \frac{P_1 V_1 - P_2 (V_1 + V_2 - V_g)}{mRT} \times 1\,000 V_m \quad (1)$$

$$Q_f = \frac{1\,000 P_3 (V_1 + V_2 - V_g)}{mRK} \times V_m \quad (2)$$

表 2 试验方案

Table 2 Experimental scheme			
组号	超声波功率 G/W	超声波频率 F/kHz	激励时间 T/min
0 号	0	0	0
1 号	250	20	60
2 号	500		
3 号	750		
4 号	1000		
5 号	500	28	30
6 号		35	
7 号		40	
8 号	1000	20	
9 号			120
10 号			

式中: Q_x 为煤样吸附的瓦斯含量,mL/g; Q_f 为超声波激励后煤中瓦斯放散量,mL/g; V_1 为参考罐体积,mL; V_2 为煤样罐体积,mL; V_g 为煤样体积,mL; V_m 为气体摩尔体积,293 K 下为 24.07 L/mol; m 为煤样质量,g; R 为普适气体常量,取值为 8.314 J/(mol·k)。

解吸率指超声波激励过程中煤中瓦斯解吸量与瓦斯吸附量的比值见下式:

$$\eta = \frac{Q_f}{Q_x} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为瓦斯解吸率,%; Q_j 为超声波激励过程中煤中瓦斯解吸量,mL/g。

放散率定义为煤中瓦斯放散 120 min 时的瓦斯累积放散量与超声波激励后煤中瓦斯含量的比值见下式:

$$\gamma = \frac{Q_f}{Q_x - Q_j} \times 100\% \tag{4}$$

式中 γ 为瓦斯放散率,%。

2 煤中瓦斯放散试验结果与分析

2.1 超声波对煤中瓦斯放散量的影响

超声波激励后煤中瓦斯放散过程和放散 120 min

时的瓦斯累积放散量、放散量变化率及瓦斯初期放散速率、速率变化率与不同超声波激励条件间关系如图 2 所示。煤中瓦斯放散时间为 120 min,但 10 min 后瓦斯放散速度已基本稳定在一个较低水平,不同激励条件间放散速度差别较小,因此,取试验前 10 min 的平均速率研究瓦斯初期放散速率^[23]。图 2 中, Q_m 为放散 120 min 时的瓦斯累积放散量,mL/g; v 为瓦斯初期放散速率,mL/(g·min)。

由图 2 可知:超声波激励可提升瓦斯放散量,且放散曲线形态及变化特征不发生改变。瓦斯放散初期放散量增长最快,随放散时间延长,瓦斯放散量呈现“快速增加—缓慢增加—稳定”的变化特征。相

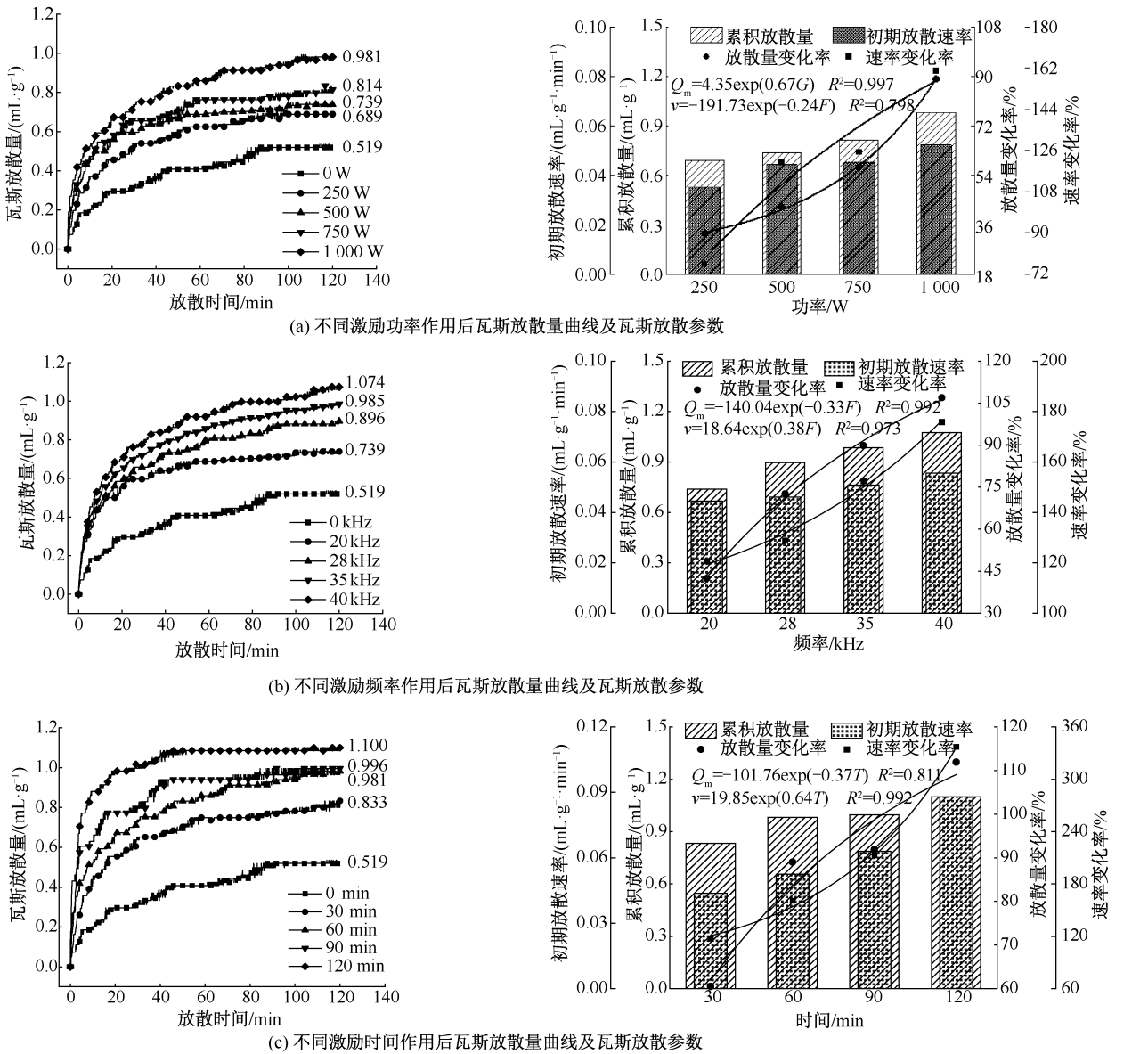


图 2 超声波激励后瓦斯放散量曲线及瓦斯放散参数

Fig. 2 Gas diffusion curve and parameters after ultrasonic stimulation

较于未激励条件,超声波功率越大,相同放散时间下的瓦斯放散量越大。超声波频率与激励时间对瓦斯放散量作用效果与超声波功率相同,随超声波频率升高、激励时间延长,瓦斯放散量增大。

瓦斯累积放散量、初期放散速率均随超声波功率增大、频率升高和激励时间延长呈指数趋势增长。当超声波功率由 250 W 增至 1 000 W 时,放散 120 min 的瓦斯累积放散量从 0.689 mL/g 显著增长至 0.981 mL/g,增幅达 42.4%。最大功率(1 000 W)下的放散量变化率为 89.02%,较最小功率(250 W)提升 2.72 倍。初期放散速率由 250 W 的 0.035 mL/(g·min)升至 1 000 W 的 0.052 mL/(g·min),提升幅度为 47.99%。功率 1 000 W 时的初期放散速率变化率达 160.71%,较 250 W 条件提高 2.11 倍,表明高功率对瓦斯放散具有显著促进效果。

随超声波频率由 20 kHz 升至 40 kHz,瓦斯累积放散量由 0.739 mL/g 增至 1.074 mL/g,增幅为 45.3%。40 kHz 时放散量变化率为 106.94%,较 20 kHz 提升 2.52 倍。相较于 20 kHz 的瓦斯初期放散速率 0.044 mL/(g·min),40 kHz 时增至 0.056 mL/(g·min),提升 25.03%。频率 40 kHz 对应的初期放散速率变化率为 175.85%,较 20 kHz 提高 1.46 倍,表明高频率更利于瓦斯持续释放。

激励时间由 30 min 延长至 120 min 时,瓦斯累积放散量从 0.833 mL/g 增至 1.100 mL/g,增幅为 32.1%。激励时间 120 min 的放散量变化率达 111.95%,较 30 min 条提升 1.85 倍。当激励时间由

30 min 增至 120 min 时,瓦斯初期放散速率从 0.044 mL/(g·min)跃升至 0.088 mL/(g·min),增幅达 101.19%。激励时间 120 min 的初期放散速率变化率为 337.22%,较 30 min 条件提高 2.87 倍,体现了超声波激励过程中的能量累积效应。

可见:超声波功率增大、频率升高和激励时间延长均可增强超声波对煤体的损伤效果。产生该现象的原因:①超声波作用于煤时会发生机械振动效应,对煤基质产生周期性交替的拉压应力和剪切力,使煤的孔裂隙结构扩展^[24],瓦斯附着空间减少,进而提高瓦斯放散量。②超声波激励能通过高频振动清除孔隙内细小颗粒^[25],改善孔隙间连通性,增加瓦斯放散通道,减小放散阻力。同时,超声波激励过程中能量累积可使煤的力学性能发生劣化,导致煤内部损伤,煤中微裂纹数量增加,增加瓦斯运移通道。因此,在超声波激励过程中,可通过增大超声波功率、提高超声波频率和延长超声波激励时间减少瓦斯吸附空间,提高瓦斯放散量,加快瓦斯放散速率,促进瓦斯放散过程。

2.2 超声波对煤中瓦斯放散率的影响

在超声波激励时煤内瓦斯压力高于大气压,在压力驱动下瓦斯发生解吸直至瓦斯压力与大气压相同。不同超声波激励条件作用时瓦斯解吸量有差异,故瓦斯放散时起始量不同。引入瓦斯放散率全面表征超声波激励对瓦斯放散特性的改造效果。超声波激励后瓦斯含量如图 3 所示,超声波激励对瓦斯含量各参数拟合结果见表 3。

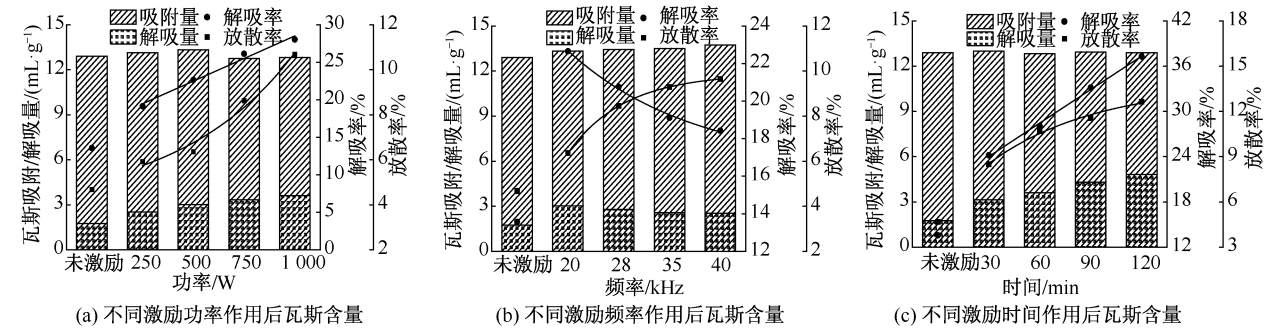


图3 超声波激励后瓦斯含量

Fig.3 Gas content after ultrasonic stimulation

分析图 3、表 3 可知:超声波激励可提高煤中瓦斯解吸量、解吸率及放散率。随超声波功率增大,瓦斯解吸量增多,解吸率、放散率提高。相较 250 W,超声波功率 1 000 W 时瓦斯解吸量由 2.52 mL/g 增长至 3.60 mL/g,提升 42.89%,解吸率、放散率分别由 19.16%、5.92% 增长至 28.05%、10.69%,提高

1.46 倍和 1.81 倍。

超声波频率与瓦斯解吸量、解吸率成正比,与瓦斯放散率成正比。20 kHz 时瓦斯解吸量 3.02 mL/g 相比 40 kHz 的 2.53 mL/g 提升 19.47%,解吸率由 18.43%增长至 22.66%,提高 1.23 倍。瓦斯放散率则由 20 kHz 的 6.36%增长至 40 kHz 的 9.65%,提高 1.52 倍。

表 3 超声波激励对瓦斯含量各参数拟合结果

Table 3 Fitting results of ultrasonic stimulation on parameters of gas content

激励条件	解吸率		放散率	
	拟合关系式	相关系数	拟合关系式	相关系数
G/W	$\eta = -22.014\exp(-0.001G)$	0.990	$\gamma = 1.197\exp(0.002G)$	0.941
F/kHz	$\eta = 17.789\exp(-0.027F)$	0.993	$\gamma = -27.543\exp(-0.099F)$	0.999
T/min	$\eta = 141.798\exp(0.001T)$	0.992	$\gamma = -8.510\exp(-0.016T)$	0.975

注:拟合关系式中平衡常数的单位均为对应自变量单位的倒数,即量纲无单位;下同。

超声波激励时间延长,120 min 的瓦斯解吸量 4.81 mL/g 相较 30 min 的 3.14 mL/g 提升 53.02%,解吸率由 24.20%增长至 37.30%,提高 1.54 倍。瓦斯放散率由 30 min 的 8.50% 增长至 120 min 的 12.65%,提高 1.49 倍。

瓦斯解吸率、放散率与超声波功率、频率和激励时间均呈指数型相关关系。超声波频率对瓦斯解吸率和放散率的作用效果相反。这是由于低频超声波在煤体中传播更深、强度更高,引起更广泛的瓦斯解吸。但高频超声波能量集中在煤体表面,对局部结构损伤效果更强,使瓦斯放散阻力降低,放散率增加。

3 超声波对煤中瓦斯放散动力学特性的影响

3.1 煤中瓦斯放散动力学模型选取与特征参数确定

选取类朗缪尔模型^[26]、准一级动力学模型^[27]及瓦斯动扩散模型^[18]分析不同超声波激励条件下煤中瓦斯放散动力学特性。

类朗缪尔模型表达式见下式:

$$Q_t = \frac{abt}{1 + bt} \tag{5}$$

式中: Q_t 为瓦斯放散量, mL/g; a 为放散常数, mL/g; b 为平衡常数, min^{-1} ; t 为放散时间, min。

准一级动力学模型见下式:

$$Q_t = q(1 - \exp(-kt)) \tag{6}$$

式中: q 为平衡时的瓦斯放散量, mL/g; k 为准一级放散速率常数, min^{-1} 。

瓦斯动扩散模型见下式:

$$\frac{Q_t}{Q_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \exp\left(\frac{-(2n + 1)^2 \pi^2 D_0}{4L^2 \beta} (1 - \exp(-\beta t))\right) \tag{7}$$

式中: Q_∞ 为极限放散量, mL/g; L 为柱煤高度, mm; D_0 为瓦斯初始扩散系数, m^2/min ; β 为扩散系数随时间的衰减系数, min^{-1} ; n 为自然数。

各动力学模型对超声波激励后瓦斯放散量曲线拟合结果及特征参数见表 4。类朗缪尔模型对瓦斯放散量曲线描述较为准确,拟合度范围为 0.900~0.988,平均拟合度 0.966。准一级动力学模型能较好的描述超声波激励后瓦斯放散量曲线,其拟合度为 0.746~0.942,平均拟合度 0.896。通过动扩散模型求解出的初始扩散系数及衰减系数与试验数据拟合度为 0.918~0.980,平均拟合度为 0.968,拟合度较高。

综上所述:3 种模型拟合效果为瓦斯动扩散模型>类朗缪尔模型>准一级动力学模型,说明瓦斯动扩散模型能够最好地描述超声波激励后瓦斯放散动力学特征参数变化,反映出超声波激励对瓦斯放散特性的影响。

表 4 各动力学模型特征参数取值

Table 4 Value of characteristic parameters of each dynamic model

激励条件		类朗缪尔模型			准一级动力学模型			瓦斯动扩散模型		
		$a/$ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	$b/$ min^{-1}	R^2	$q/$ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k/$ min^{-1}	R^2	$D_0/$ ($\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)	$\beta/$ min^{-1}	R^2
G/W	0	0.627	0.039	0.956	0.514	0.035	0.924	1.097	0.019	0.973
	250	0.761	0.077	0.979	0.667	0.057	0.931	1.645	0.031	0.980
	500	0.773	0.134	0.987	0.701	0.087	0.923	1.697	0.032	0.973
	750	0.839	0.124	0.972	0.765	0.081	0.892	1.741	0.034	0.968
	1000	1.026	0.096	0.945	0.909	0.066	0.853	1.821	0.037	0.980
F/kHz	20	0.773	0.134	0.987	0.701	0.087	0.923	1.697	0.032	0.973
	28	0.954	0.087	0.973	0.839	0.062	0.905	1.849	0.034	0.975
	35	1.038	0.090	0.978	0.915	0.064	0.910	1.936	0.036	0.977
	40	1.123	0.092	0.977	1.000	0.065	0.911	2.015	0.037	0.975

续表 4

激励条件		类朗缪尔模型			准一级动力学模型			瓦斯动扩散模型		
		$a/$ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	$b/$ min^{-1}	R^2	$q/$ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k/$ min^{-1}	R^2	$D_0/$ ($\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)	$\beta/$ min^{-1}	R^2
T/min	30	0.862	0.094	0.988	0.761	0.067	0.942	1.456	0.031	0.976
	60	1.026	0.096	0.945	0.909	0.066	0.853	1.821	0.037	0.980
	90	1.010	0.208	0.900	0.941	0.118	0.746	2.070	0.047	0.938
	120	1.131	0.308	0.980	1.073	0.179	0.931	2.924	0.056	0.918

3.2 超声波激励对瓦斯放散动力学特征参数的影响

选取瓦斯动扩散模型反映超声波激励对瓦斯动力学特征参数的影响,超声波激励后瓦斯放散动力

学特征参数 D_0 及 β 与不同超声波激励条件间关系及其拟合结果如图 4 所示。由图 4 可知: D_0 及 β 在超声波激励下变化趋势相同,均与超声波功率、频率和激励时间呈指数型正相关关系。

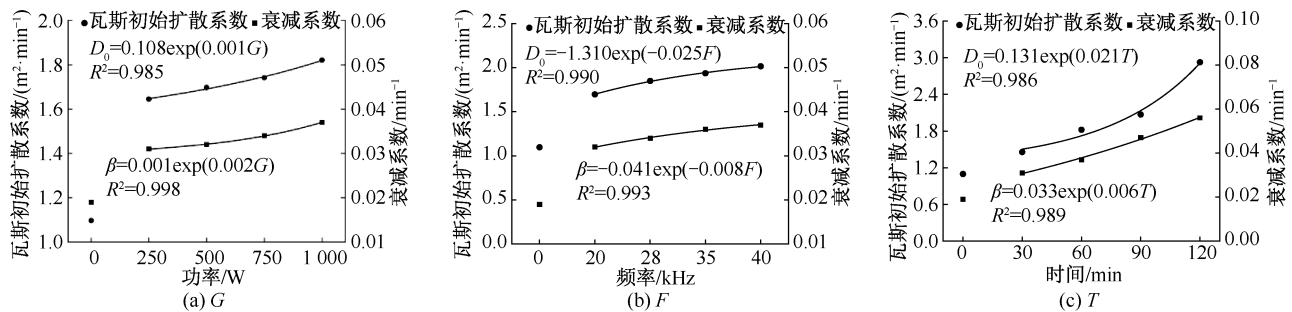


图 4 激励条件对动力学模型特征参数的影响

Fig. 4 Influence of stimulation conditions on characteristic parameters of dynamic model

D_0 可综合表征瓦斯放散能力, β 则是瓦斯放散能力随时间的衰减程度,故两者变化趋势相同。超声波激励后 D_0 增大,表明超声波可增强煤中瓦斯放散能力、提高放散量和加快放散速率,使煤中瓦斯放散过程更容易发生。

D_0 在超声波功率由 250 W 增长至 1 000 W 时,由 1.645 m^2/min 增长至 1.821 m^2/min , β 由 0.031 min^{-1} 增长至 0.037 min^{-1} 。为探究超声波功率促进瓦斯放散原因,将超声波看作高频机械波。功率增大时声波驱动力做功增强、振幅变大,引起煤基质振动加剧、机械能增强,且煤基质间拉压应力增大,孔隙萌生扩展、裂隙连通性加强,更利于瓦斯放散过程的发生。故瓦斯放散动力学特征与超声波功率呈正比。

D_0 由超声波频率 20 kHz 的 1.697 m^2/min 增长至 40 kHz 的 2.015 m^2/min , β 由 0.032 min^{-1} 增长至 0.037 min^{-1} 。超声波频率与波长间关系见下式:

$$\lambda = \frac{c}{F} \tag{8}$$

式中: λ 为超声波波长,m; c 为超声波波速,m/min。由式(8)可以看出,超声波频率升高,声波波长变短,更易引起微小孔隙结构共振,在微孔处应力更集

中、激发孔隙结构扩展,使孔隙间连通性增强,孔隙结构改善。引起煤中裂隙通道中的微小颗粒共振并发生位移或脱落,增加瓦斯运移通道。故瓦斯放散动力学特征与超声波频率呈正比。

D_0 从激励时间 30 min 的 1.456 m^2/min 增长至 120 min 的 2.924 m^2/min , β 由 0.031 min^{-1} 增长至 0.056 min^{-1} 。为探究超声波激励时间对瓦斯放散的改造效果,将超声波看作循环载荷,煤基质间发生疲劳损伤。超声波激励时间与驱动力循环次数呈正相关关系,增加循环次数可使煤基质疲劳强度降低,更容易发生塑性形变。且随超声波激励时间延长,声波能量不断累积,超声波作用效果增强,进一步加剧煤的损伤破裂程度,使孔裂隙扩展贯通,进而提高煤体瓦斯放散效率。故瓦斯放散动力学特征与超声波激励时间呈正比。

4 结 论

1) 超声波功率增大、频率升高和激励时间延长均能有效提高瓦斯放散量。当功率由 250 W 增至 1 000 W、频率由 20 kHz 增至 40 kHz、激励时间由 30 min 延长至 120 min,瓦斯放散量分别提升

42.4%、45.3%和32.1%。

2) 超声波功率增大、频率升高和激励时间延长均能有效提高瓦斯放散率。当功率由250 W增至1 000 W、频率由20 kHz增至40 kHz、激励时间由30 min延长至120 min,瓦斯放散率分别提升1.81、

1.52和1.49倍。

3) 对比3种动力学模型,拟合效果为瓦斯动扩散模型>类朗缪尔模型>准一级动力学模型。超声波功率、频率与激励时间与初始扩散系数 D_0 呈指数型正相关关系,与衰减系数 β 呈幂函数关系。

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 gas simultaneous mining technology system under dual carbon target[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1 416-1 429.
- [2] 王海军,齐庆杰,梁运涛,等.我国煤矿重特重大事故统计分析及对策建议[J].中国安全科学学报,2024,34(9):9-18.
WANG Haijun, QI Qingjie, LIANG Yuntao, et al. Statistical analysis and countermeasures of major accidents in coal mines in China[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 9-18.
- [3] 王恩元,张国锐,张超林,等.我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(1):297-322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297-322.
- [4] DENG Jun, LI Xin, WANG Kai, et al. Advances and prospects in the risk prediction and early warning technology for the compound disaster of coal spontaneous combustion and gas explosion[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025: DOI: 10.1016/j.psep.2025.107489.
- [5] 李生亚,高坤,张斌峰,等.瓦斯抽采泵站智能化应用研究[J].中国安全科学学报,2023,33(增2):85-90.
LI Shengya, GAO Kun, ZHANG Binfeng, et al. Research on intelligent application of gas pumping stations[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S2): 85-90.
- [6] 刘玉冰,王恩元,张东明,等.真三轴应力条件下破碎煤体力学响应及渗流特性试验研究[J].中国安全科学学报,2023,33(6):105-113.
LIU Yubing, WANG Enyuan, ZHANG Dongming, et al. Experimental study on mechanical response and seepage characteristics of broken coal under true triaxial stress[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 105-113.
- [7] 孙珍平.长期应力作用下煤体渗透特性与演化规律研究[J].煤矿安全,2025,56(6):33-41.
SUN Zhenping. Study on evolution law of coal permeability characteristics under long-term stress[J]. Safety in Coal Mines, 2025, 56(6): 33-41.
- [8] 李柏,刘鹏,胡彪,等.煤层注 CO_2 驱替抽采瓦斯的数值模拟及敏感性分析[J].矿业研究与开发,2024,44(12):169-176.
LI Bai, LIU Peng, HU Biao, et al. Numerical simulation and sensitivity analysis of gas drainage by CO_2 injection in coal seam[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(12): 169-176.
- [9] 薛伟超.煤的原位瓦斯放散初速度测定装置及方法研究[J].工矿自动化,2024,50(4):121-127.
XUE Weichao. Study on the device and method for measuring the initial velocity of in-situ gas emission from coal[J]. Mine Automation, 2024, 50(4): 121-127.
- [10] 富向,沙慧慧,陈志平,等.热力-动力复合变质煤的瓦斯放散特征及表征指标研究[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2023,42(6):641-648.
FU Xiang, SHA Huihui, CHEN Zhiping, et al. Study on gas emission characteristics and characterization indexes of thermal-dynamic compound metamorphic coal[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2023, 42(6): 641-648.
- [11] 安丰华,贾宏福,刘军.煤孔隙特征对瓦斯放散初速度影响研究[J].煤炭科学技术,2021,49(9):82-87.
AN Fenghua, JIA Hongfu, LIU Jun. Study on the influence of coal pore characteristics on the initial velocity of gas emission[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 82-87.
- [12] 安丰华,贾宏福,刘军.基于煤孔隙构成的瓦斯扩散模型研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(5):987-996.
AN Fenghua, JIA Hongfu, LIU Jun. Study on gas diffusion model based on coal pore composition[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 987-996.
- [13] 薛洪来,闵政,温哲.含瓦斯煤经典扩散模型数学关系研究[J].煤矿安全,2024,55(10):1-8.
XUE Honglai, MIN Zheng, WEN Zhe. Study on the mathematical relationship of classical diffusion model of gas coal[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(10): 1-8.

- [14] 刘彦伟, 贾浩杰, 左伟芹, 等. 基于有效分子自由程的纳米孔隙气体传输模型[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 90-99.
LIU Yanwei, JIA Haojie, ZUO Weiqin, et al. Nanopore gas transport model based on effective molecular free path[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2022, 51(1): 90-99.
- [15] 刘彦伟, 李通, 薛文涛. 软硬煤瓦斯扩散系数动态变化规律的差异性[J]. 煤矿安全, 2017, 48(9): 17-20, 24.
LIU Yanwei, LI Tong, XUE Wentao. Difference of dynamic change law of gas diffusion coefficient in soft and hard coal[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(9): 17-20, 24.
- [16] 刘彦伟, 薛文涛. 水分对煤粒瓦斯扩散动态过程的影响规律[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 62-66.
LIU Yanwei, XUE Wentao. Effect of moisture on the dynamic process of gas diffusion in coal particles[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 62-66.
- [17] 李志强, 成墙, 刘彦伟, 等. 柱状煤芯瓦斯扩散模型与扩散特征实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 1 033-1 040.
LI Zhiqiang, CHENG Qiang, LIU Yanwei, et al. Experimental study on gas diffusion model and diffusion characteristics of columnar coal core[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(5): 1 033-1 040.
- [18] 李志强, 陈金生, 李林, 等. 煤层瓦斯微纳米串联多尺度动态扩散渗透率实验-模型-机理及意义[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1 551-1 566.
LI Zhiqiang, CHEN Jinsheng, LI Lin, et al. Coal seam gas micro-nano series multi-scale dynamic diffusion permeability experiment-model-mechanism and significance[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1 551-1 566.
- [19] 张迪, 丰程涛, 李鹏, 等. 煤粒瓦斯解吸-扩散数值模型适用性及参数敏感性研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(10): 281-288.
ZHANG Di, FENG Chengtao, LI Peng, et al. Applicability and parameter sensitivity of coal particle gas desorption-diffusion numerical model[J]. Coal Engineering, 2024, 56(10): 281-288.
- [20] ZHANG Jie, LUO Wen, WAN Tingyu, et al. Experimental investigation of the effects of ultrasonic stimulation on adsorption, desorption and seepage characteristics of shale gas[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 200: DOI: 10.1016/j.petro. 2021.108418.
- [21] SUN Yong, ZHAI Cheng, MA Huiteng, et al. Changes of coal molecular and pore structure under ultrasonic stimulation[J]. Energy and Fuels, 2021, 35(12): 9 847-9 859.
- [22] 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.
- [23] 赵洪宝, 张欢, 王飞虎, 等. 透气夹矸层对煤层瓦斯放散特性影响研究[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(2): 162-171.
ZHAO Hongbao, ZHANG Huan, WANG Feihu, et al. Research on influences on gas emission characteristic of coal seam caused by penetration partings[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(2): 162-171.
- [24] 李傲, 王玉娟, 郭晓阳, 等. 超声空化诱导煤微观孔隙损伤的原位测试技术研究[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(8): 30-35.
LI Ao, WANG Yujuan, GUO Xiaoyang, et al. Study on in-situ testing technology for microscopic pore damage in coal induced by ultrasonic cavitation[J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(8): 30-35.
- [25] 侯迎港. 超声波强化细粒无烟煤表面疏水力制备超纯煤技术研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2024.
HOU Yinggang. Study on ultrasonic-enhanced surface hydrophobicity of fine anthracite to prepare ultra-pure coal[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2024.
- [26] 唐明云, 张海路, 段三壮, 等. 基于 Langmuir 模型温度对煤吸附解吸甲烷影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 182-189.
TANG Mingyun, ZHANG Hailu, DUAN Sanzhuang, et al. Study on effect of temperature on methane adsorption and desorption in coal based on Langmuir model[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 182-189.
- [27] AKSU Z. Biosorption of reactive dyes by dried activated sludge: equilibrium and kinetic modeling[J]. Biochemical Engineering Journal, 2001, 7(1): 79-84.

作者简介: 张笑盈 (2001—), 女, 河南许昌人, 博士研究生, 主要研究方向为煤与瓦斯共采。E-mail: 1735407866@qq.com。

