

# Seepage Characteristics of Methane in Coal under Ultrasonic Wave

Zhipeng Kang<sup>1</sup>, Chao Song<sup>2</sup>, Yongdong Jiang<sup>1</sup>, Sujian Wang<sup>2</sup>, Peng Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing

<sup>2</sup>Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute Co. Ltd., Xi'an shaanxi

Email: kangzpcq@qq.com, jiangyd1015@163.com

Received: Aug. 15<sup>th</sup>, 2019; accepted: Sep. 15<sup>th</sup>, 2019; published: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2019

## Abstract

In order to improve the permeability of coal, the seepage characteristics of coalbed methane under different treatment time and power of ultrasonic wave were studied by the self-developed experimental system of coalbed methane seepage under ultrasonic wave. The results show that the permeability of coal decreases rapidly with the increase of the average effective stress and the effective axial pressure before and after the ultrasonic treatment, which shows a negative exponential relation. When the stress is constant, the permeability of coal increases significantly with time, and then tends to be stable. As the ultrasonic frequency is 25 kHz, the expansion area of cracks increase and the permeability of coal increases with the increase of ultrasonic power. And the ratio of permeability before and after ultrasonic treatment is linear with ultrasonic power. The permeability of coal increased by ultrasonic wave is the result of cavitation effect, mechanical effect and thermal effect.

## Keywords

Methane, Ultrasonic Wave, Power, Permeability

# 超声波作用下煤中甲烷的渗流特性

康智鹏<sup>1</sup>, 宋超<sup>2</sup>, 姜永东<sup>1</sup>, 王苏健<sup>2</sup>, 王鹏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆

<sup>2</sup>陕西煤业化工技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

Email: kangzpcq@qq.com, jiangyd1015@163.com

收稿日期: 2019年8月15日; 录用日期: 2019年9月15日; 发布日期: 2019年9月22日

## 摘要

为了提高煤的渗透率, 采用自主研发的超声波作用下煤层气渗流实验系统研究了超声波作用时间、功率

文章引用: 康智鹏, 宋超, 姜永东, 王苏健, 王鹏. 超声波作用下煤中甲烷的渗流特性[J]. 渗流力学进展, 2019, 9(3): 17-23. DOI: 10.12677/apf.2019.93003

对甲烷渗流特性的影响。实验得出：超声波作用前后煤的渗透率随平均有效应力、有效轴压的增加而迅速减小，呈负指数关系；当应力恒定时，随着时间的增加，超声波作用下煤的渗透率明显增加，后趋于稳定；当超声波频率为25 kHz时，随着功率的增加，煤体裂隙的扩展范围增大，煤的渗透率增加，且超声波作用后渗透率与功率呈线性关系；超声波提高煤的渗透率是空化效应、机械作用和热效应共同作用的结果。

## 关键词

甲烷，超声波，功率，渗透率

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

煤层气属于非常规天然气，其主要成分是甲烷。我国煤层气在埋深 2000 米以浅，储量约 36.8 万亿立方米，是一笔可支配的较洁净的能矿资源和化工原料[1] [2]。由于我国煤矿地质条件极其复杂，普遍存在“三高一低”的特点，绝大部分煤层气储层属于低渗透储层，平均渗透率在 0.002~16.17 mD，造成煤层气难以抽采[3] [4]。

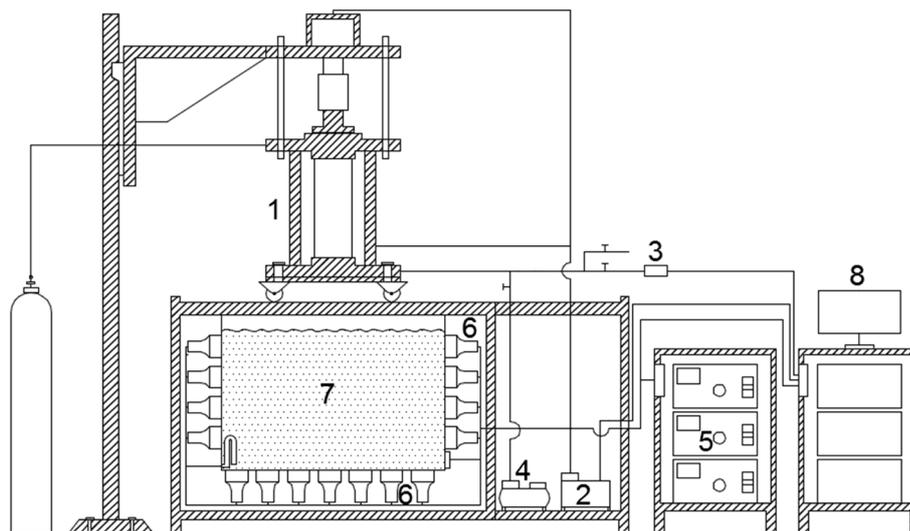
为了提高煤层气的渗透率，国内外提出了水力化、多分支水平井、松动爆破、物理场激励等增渗技术。邱爱慈团队[5] [6]提出了电脉冲增渗方法，电脉冲可控冲击波释放的能量依次在煤层中形成冲击波带、压缩波带和弹性波带，通过破裂、撕裂、高弹性波扰动等作用于煤储层，改善煤储层的渗透性，促进煤层气解吸、渗流；易俊[7]研究了声场下煤层气的运移规律，揭示了声震法提高煤储层渗透率的机理；姜永东[8] [9] [10] [11]研究得出：声震法能促进煤层气的解吸、扩散、渗流，提高煤储层渗透率，并建立了声场作用下煤吸附甲烷、解吸模型和多场耦合下的渗流方程，并开展了现场试验；李晓红[12]利用空化水射流产生的声震效应强化瓦斯解吸、渗流，得出空化声震效应能促进煤中瓦斯解吸，解吸时间缩短；赵丽娟[13] [14]通过实验发现超声波对提高煤岩渗透率和解吸率具有明显的促进作用，并对其机理进行了探讨；于永江[15]结合声学理论探讨了超声波提高煤储层解吸量和渗透率的机理；Yu G [16]利用超声波速度装置得到在同一时间的影响下，功率越大，孔隙越多，且低功率适用于微孔，高功率明显改变大孔；Ozkan [17]分析了超声波辅助煤浮选的机理，发现在一定的频率和时间间隔下，超声波的空化过程，可以改善煤表面，促使局部温度和压力的显著变化。宋洋[18]试验发现机械振动产生的应力波能够加快煤岩体内部裂隙的发育，煤岩渗透率随孔隙压力的变化规律符合 Klinkenberg 效应。

综上所述，声场能提高煤层气的抽采率，但应力场、渗流场、声场耦合作用下煤中甲烷的渗流特性研究较少，论文在以上研究成果的基础上，进一步研究了超声波作用下不同应力、时间、功率对煤层渗透率的影响。

## 2. 实验设备及方法

实验采用自主研发的超声波作用下煤层气渗流实验装置，如图 1 所示。装置由三轴压力室、液压泵、气体流量计、真空泵、超声波发生器、换能器、水浴槽和控制系统组成。设备参数：轴向应力 100 MPa，围压 20 MPa，气压 8 MPa，气体流量计量程 0~5 L/min，精度为 0.0001 L/min，最大轴向位移为 60 mm。

超声波频率 25 kHz，单台超声波发生器功率为 3 kW，总功率为 18 kW。设备可以测试应力场、渗流场、声场耦合作用下煤中甲烷的渗流规律。



1—三轴压力室；2—液压泵；3—气体流量计；4—真空泵；5—超声波发生器；6—换能器；7—水浴槽；8—控制系统

Figure 1. Experimental device for seepage of coalbed methane under ultrasonic wave

图 1. 超声波作用下煤层气渗流实验装置

实验主要步骤：①在煤样表面涂上硅胶，自然固化后，将煤样和压头用热缩管密封，安装在三轴压力室内；②将三轴压力室密封后放入超声波水浴槽内，对煤样抽真空 8h，将水浴槽加热到实验所需温度，启动伺服液压泵、轴压控制器和围压控制器，对煤样施加轴压和围压；③开启高压甲烷气瓶和减压阀向煤样中注入甲烷，使煤样吸附甲烷至饱和；④设置实验所需的超声波参数，启动超声波发生器对煤样施加声场；⑤待出气端甲烷流量稳定后，记录气体流量计读数。

### 3. 实验方案

实验煤样为陕西黄陵矿业公司二号煤矿，将煤块取芯、加工为  $\phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的圆柱体试件，实验方案如下：

1) 不加超声波与超声波激励下煤中甲烷的渗流实验。实验模拟了埋深 200 m 至 400 m 的煤样 SH7-1、SH7-2、SH7-3 在不同应力场、孔隙压力、超声波作用下的渗流特性，实验方案如表 1 所示。恒定应力场、孔隙压力条件下，不加超声波时煤中甲烷的流量测试完毕后，打开超声波发生器作用 30 min 后，测试超声波激励下煤中甲烷的流量，然后分析煤储层的渗透率与应力场、声场的关系。

2) 超声波激励时间对煤样渗透率的影响。实验模拟了埋深 200 m 至 400 m 的煤样 SH8-1、SH8-2、SH8-3 在不同条件下的渗流特性，实验方案如表 2 所示。恒定应力场、孔隙压力条件下超声波长时间作用下煤的渗透率，实验中开启超声波发生器，每隔 30 min 测定一次甲烷的流量，超声波激励时间大于 3 小时，然后分析超声波激励时间与煤储层渗透率的变化规律。

3) 超声波功率对煤样渗透率的影响，实验条件为：煤样加载的轴向应力 3 MPa，围压 3 MPa，甲烷压力 2 MPa；超声波频率为 25 kHz，功率分别为 0 kW、1.5 kW、2.1 kW、2.4 kW、3 kW。实验中开启超声波发生器，测定不同功率的超声波作用下煤中甲烷的流量，然后分析煤的渗透率与功率的关系。

**Table 1.** Experimental conditions of methane seepage in coal under ultrasonic wave  
**表 1.** 超声波激励下煤中甲烷渗流实验条件

实验煤样	轴压(MPa)	围压(MPa)	气压(MPa)
SH7-1	5	1.5	1
			0.8
			0.6
			0.4
			0.2
SH7-2	7.5	2.4	1
			0.8
			0.6
			0.4
			0.2
SH7-3	10	3	1
			0.8
			0.6
			0.4
			0.2

**Table 2.** Experimental conditions of methane seepage in coal under ultrasonic treatment time  
**表 2.** 超声波激励时间煤中甲烷渗流实验条件

实验煤样	轴压(MPa)	围压(MPa)	气压(MPa)
SH8-1	5	1.5	0.6
SH8-2	7.5	2.4	0.8
SH8-3	10	3	1

## 4. 实验结果分析

### 4.1. 超声波作用下煤中甲烷的渗流特性

根据表 1 的实验方案, 不加超声波和超声波激励下煤层中甲烷的渗流结果图 2 所示, 由图可知: 不加超声波和超声波激励下煤样的渗透率随平均有效应力的变化规律相同, 均呈负指数函数关系减小。减小的主要原因是随着有效轴压、有效围压的增加, 煤样不断被压密, 煤样的孔隙、裂隙逐渐闭合, 导致煤体的扩散和渗流通道变窄, 阻碍了气体流体, 因此煤样的渗透率减小; 当平均有效应力相同时, 超声波激励下煤的渗透率大于不加超声波, 表明超声波激励能提高煤的渗透率, 且功率越大越明显。

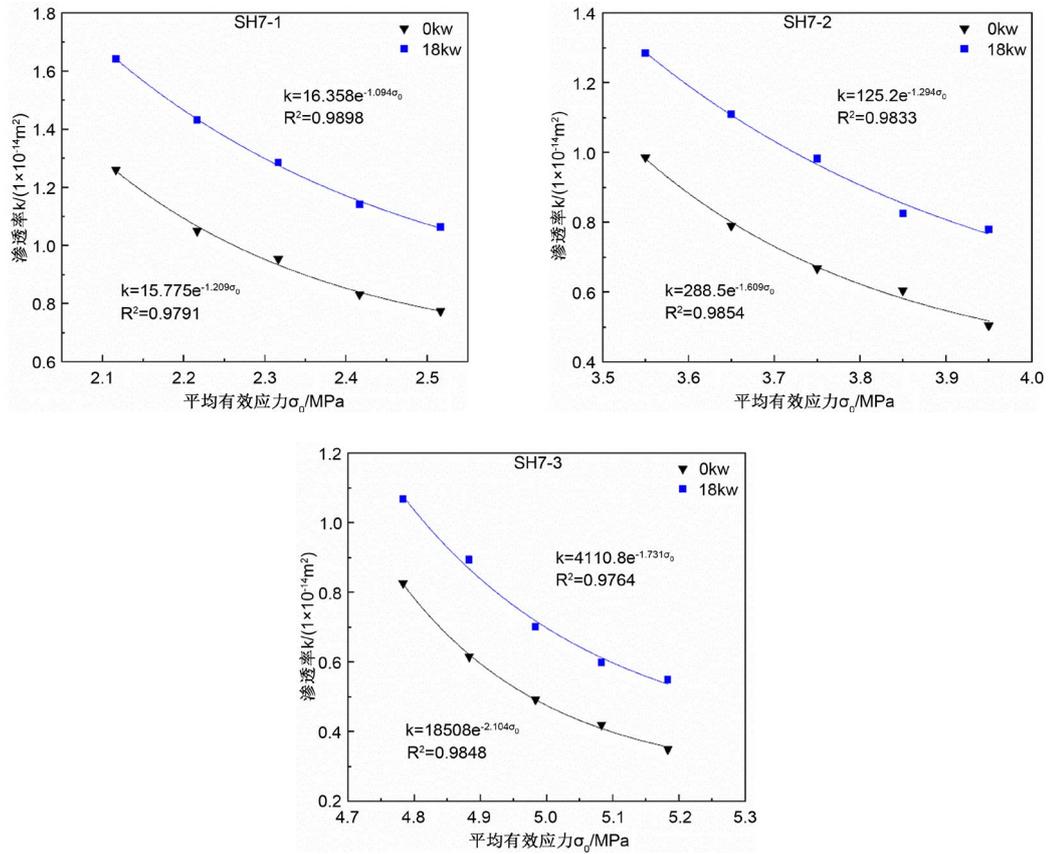


Figure 2. Permeability-average effective stress curves before and after ultrasonic wave treatment  
图 2. 超声波激励前后平均有效应力和渗透率曲线

#### 4.2. 超声波作用时间对煤渗透率的影响

根据表 2 的实验方案, 不同时间超声波激励下煤的渗透率实验结果如图 3 所示, 从图中可得出: 当煤样所受的轴向应力、围压和气压恒定时, 随着超声波激励时间的增加, 煤的渗透率前期增加较快, 基本呈线性增大, 超声波激励 2.5 小时内, 煤样 SH8-1、SH8-2 和 SH8-3 的渗透率分别增长了 66%、59%和 62%, 平均增长了 62%, 然后趋于平缓。以上表明, 超声波作用时间影响煤的渗透率, 但影响范围是有限的。

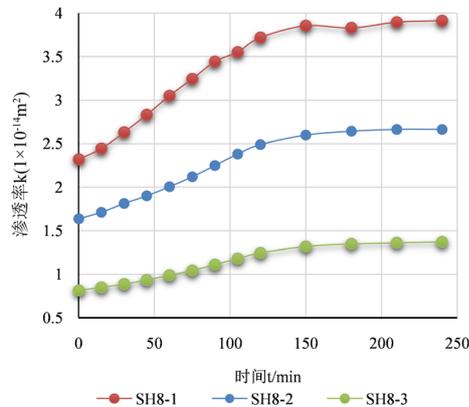


Figure 3. Permeability- ultrasonic treatment time curves  
图 3. 超声波激励时间和渗透率曲线

### 4.3. 超声波功率对煤渗透率的影响

实验结果图 4 所示，从图中可以得出：在应力、气压恒定时，随着超声波功率的增加，煤的渗透率随之增加，当超声波功率为 3 kW 时，CP3-1 和 CP3-2 煤样渗透率分别增长了 4.2%、7.9%。煤的渗透率与超声波功率 P 呈线性递增关系。

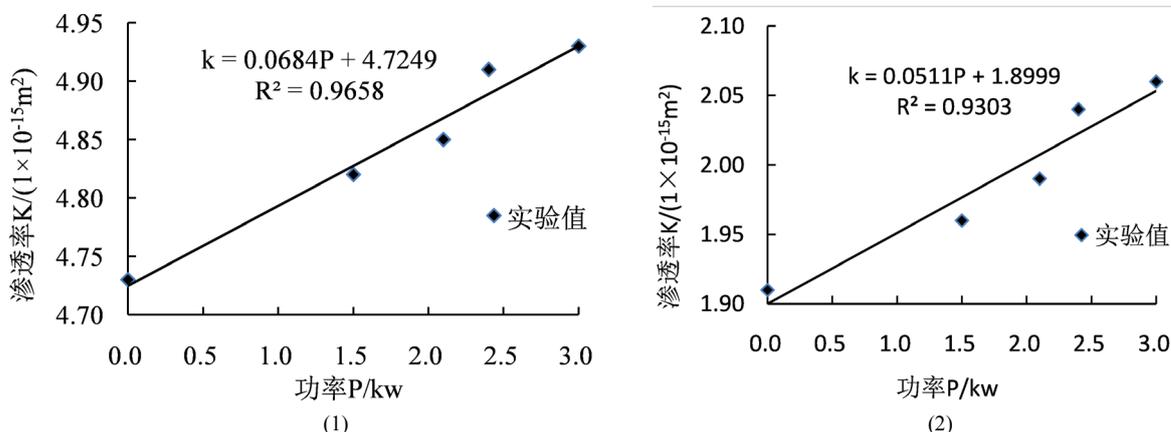


Figure 4. Relationship between coal permeability and ultrasonic power. (1) CP3-1 sample; (2) CP3-1 sample  
图 4. 煤的渗透率与超声波功率的关系。(1) 试件 CP3-1 实验曲线；(2) 试件 CP3-2 实验曲线

### 5. 超声波增渗机理分析

本文利用扫描电镜观测了功率 3 kW、频率 25 kHz 的超声波作用前后煤样的微观结构，实验结果图 5 所示，由图可看出，煤的孔裂隙结构较发育，超声波作用后，煤表面和裂缝中的松散颗粒脱落，渗流通道被清洗干净，连通率增加，有利于煤层气渗流。这主要是超声波空化效应、机械效应、热效应共同作用的结果。

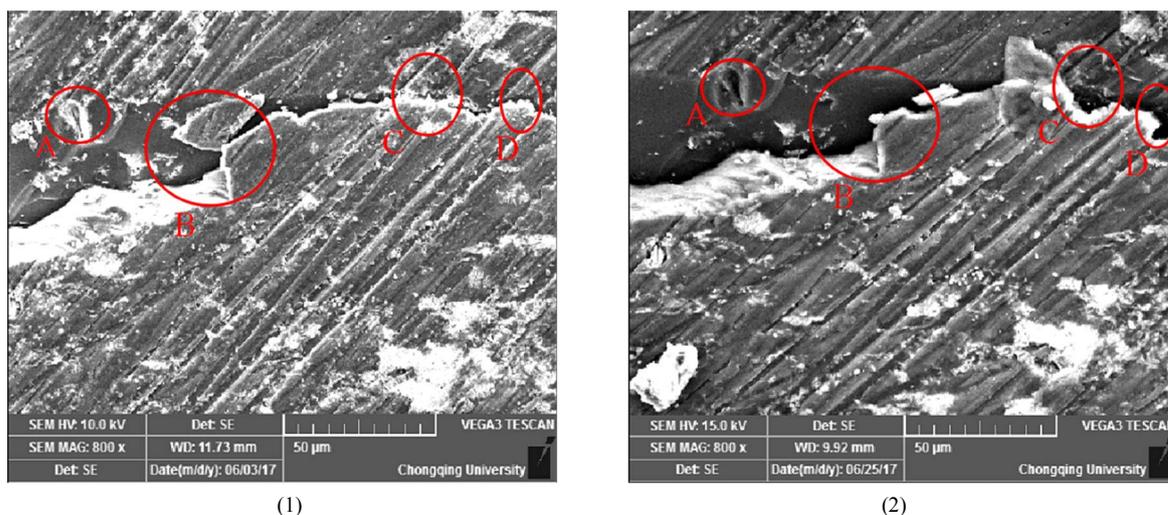


Figure 5. Surface characteristics of coal before and after ultrasonic treatment. (1) Before ultrasonic treatment; (2) after ultrasonic treatment

图 5. 超声波作用前后煤的表面特征。(1) 超声波作用前；(2) 超声波作用后

超声波在含水煤层中传播，空化效应将产生大量的空化核，生成的空腔立刻受到相邻压缩区的压力而迅速破裂，产生高达几千大气压的瞬时压力，使煤体破裂产生新的孔隙；超声波在煤层传播过程中振

动效应使煤体与气体之间产生不同的加速度和振幅,能让固、气分离,同时能让裂缝中的松散煤颗粒脱落,清洗煤层气渗流通道;超声波的热效应能使煤体、煤层气升温,给煤中的煤层气解吸持续提供能量热能。

## 6. 结论

1) 超声波作用前后煤的渗透率随平均有效应力的变化趋势一致,呈负指数关系;超声波作用下煤的渗透率增大。

2) 超声波长时间作用下,煤的渗透率先增加后趋于平缓,且渗透率与功率呈线性关系增大。

3) 超声波提高煤样渗透率是空化效应、机械作用和热效应共同作用的结果,主要表现在两个方面:一是改变煤储层的孔裂隙结构;二是促进煤层气在孔裂隙的运移。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目(51574049)。

## 参考文献

- [1] 冯增朝. 低渗透煤层瓦斯强化抽采理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] Zhou, F., Xia, T., Wang, X., Zhang, Y., Sun, Y. and Liu, J. (2016) Recent Developments in Coal Mine Methane Extraction and Utilization in China: A Review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **31**, 437-458. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.03.027>
- [3] 姚成林. 煤层气综合利用趋势研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(1): 96-99.
- [4] 申宝宏, 刘见中, 雷毅. 我国煤矿区煤层气开发利用技术现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 1-4.
- [5] 张永民, 邱爱慈, 秦勇. 电脉冲可控冲击波煤储层增透原理与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 79-85.
- [6] 李恒乐, 秦勇, 张永民, 等. 重复脉冲强冲击波对肥煤孔隙结构影响的实验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 915-921.
- [7] 易俊. 声震法提高煤层气抽采率的机理及技术原理研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [8] 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(S1): 154-159.
- [9] 姜永东, 宋晓, 刘浩, 等. 大功率声波作用下煤层气吸附特性及其模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1): 152-157.
- [10] 姜永东, 宋晓, 崔悦震, 等. 声场作用煤中甲烷解吸扩散的特性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 623-628.
- [11] Jiang, Y.D., Song, X., Liu, H., et al. (2015) Laboratory Measurements of Methane Desorption on Coal during Acoustic Stimulation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **78**, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.04.019>
- [12] 李晓红, 冯明涛, 周东平, 等. 空化水射流声震效应强化煤层瓦斯解吸渗流的实验[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(4): 1-5.
- [13] 赵丽娟, 秦勇. 超声波作用对改善煤储层渗透性的实验分析[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 747-752.
- [14] 赵丽娟. 超声波作用下的煤层气吸附-解吸规律实验[J]. 地质勘探, 2016, 32(2): 21-25.
- [15] 于永江, 张春会, 等. 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, 2008, 42(6): 805-808.
- [16] Yu, G., Zhai, C., Qin, L., et al. (2018) Changes to Coal Pores by Ultrasonic Wave Excitation of Different Powers. *Journal of China University of Mining & Technology*, **47**, 264-270 and 322.
- [17] Ozkan, S.G. (2018) A Review of Simultaneous Ultrasound-Assisted Coal Flotation. *Journal of Mining & Environment*, **9**, 679-689.
- [18] 宋洋, 吴贝宁. 机械振动作用下含瓦斯煤岩渗透率演化规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(1): 6-10.