



推荐阅读：

- [综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究](#)
- [高瓦斯突出煤层综采工作面注水降尘技术应用研究](#)
- [超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究](#)
- [风速对近距离煤层采空区漏风及煤自然影响研究](#)
- [深部高瓦斯矿井大采高工作面立体抽采瓦斯技术](#)
- [水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究](#)
- [巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究](#)
- [高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究](#)
- [高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究](#)
- [寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析](#)
- [我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展](#)
- [基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究](#)
- [松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)
- [综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究](#)
- [我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)
- [高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究](#)
- [原生结构煤与构造煤孔隙结构与瓦斯扩散特性研究](#)
- [不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究](#)
- [顺层瓦斯抽采钻孔封隔一体化封孔工艺研究](#)
- [煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究](#)



移动扫码阅读

姜永东,宋超,王苏健,等.超声波激励下煤层气解吸扩散特性的研究[J].煤炭科学技术,2020,48(3):174-179. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.03.020  
 JIANG Yongdong, SONG Chao, WANG Sujian, et al. Study on desorption and diffusion characteristics of coalbed methane under ultrasonic excitation [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (3): 174 - 179. doi: 10.13199/j.cnki.est.2020.03.020

## 超声波激励下煤层气解吸扩散特性的研究

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

(1.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044;2.陕西煤业化工技术研究院有限责任公司,陕西 西安 710065)

**摘要:**为了揭示超声波强化煤层气高效抽采的机理,自主研发了可控超声波激励煤吸附/解吸甲烷试验装置,试验研究了不同功率的超声波激励下煤中甲烷的解吸规律,结果表明:不加超声波和超声波激励下煤中甲烷的解吸力学规律相同,在煤中的甲烷解吸全过程中,甲烷的初始解吸速度较大,随着时间的缓慢增加,解吸速度逐渐减小,最终趋于0,且解吸规律能很好地遵循扩散模型;超声波作用下煤中甲烷解吸量增大,且超声波功率越大,解吸量增幅增加,解吸量增加26.1%~65.6%;基于传热传质学理论,超声波激励下煤的传质毕欧准数减小,扩散系数增大,表明超声波能促进甲烷解吸、扩散。

**关键词:**超声波;煤层气;解吸;扩散;扩散模型;热效应

**中图分类号:**P618      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2020)03-0174-06

### Study on desorption and diffusion characteristics of coalbed methane under ultrasonic excitation

JIANG Yongdong<sup>1</sup>, SONG Chao<sup>2</sup>, WANG Sujian<sup>2</sup>, KANG Zhipeng<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>, HUANG Kejun<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to reveal mechanism of high-efficiency extraction of coalbed methane by ultrasonic, a new experimental equipment was invented for absorption/desorption research of methane on coal. The methane desorption rules of coal under different ultrasonic excitations were experimentally studied. The results show that there is no difference in dynamic behaviors of methane desorption on coal with or without acoustic wave influence, which are all in accordance with diffusion model. During the entire process of methane desorption in coal, the initial desorption rate is relatively large. With the increase of time, the desorption rate gradually decreases and eventually approaches 0, and the desorption law can well follow the diffusion model; the desorption amount of methane in coal increases under the action of ultrasound, and the larger the ultrasonic power, the increase in desorption amount increases, and the desorption amount increases by 26.1% to 65.6%. Based on the theory of heat and mass transfer, Biot's criterion of mass transmission decreases and diffusion coefficient increases under a coustic wave stimulation, indicating that ultrasonic can promote the desorption and diffusion of methane.

**Key words:** ultrasonic wave; coalbed methane; desorption; diffusion; diffusion model; thermal effect

## 0 引言

当前,国内外低渗透煤层高效开发煤层气主要采用水力压裂<sup>[1-2]</sup>、水力割缝<sup>[3]</sup>、注气<sup>[4]</sup>、预裂爆破<sup>[5]</sup>、水平井技术<sup>[6]</sup>、物理场激励等增渗技术,其中

物理场激励包括电脉冲、电磁场、超声波激励技术。张永民等<sup>[7]</sup>创新性地提出了重复脉冲强冲击波增透储层新技术,并应用于化石能源、煤层气开发领域。李恒乐等<sup>[8]</sup>研究了重复脉冲强冲击波对肥煤孔隙结构的影响,得出电脉冲激励下煤体产生裂缝,

收稿日期:2019-11-25;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(51574049);教育部创新团队资助项目(IRT\_17R112)

作者简介:姜永东(1977—),男,贵州凤冈人,教授,博士生导师,博士。E-mail:jyd@cqu.edu.cn

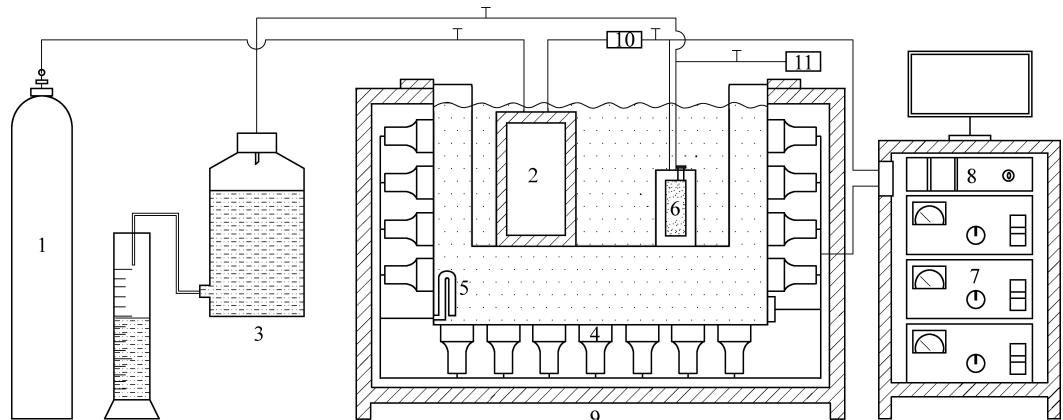
煤的孔容、孔隙度增大,渗透率增加,有利于煤层气产出。文献[9-10]研究表明,交变电磁场作用使煤吸附能力降低,吸附量减少,瓦斯热运动加剧,增强了瓦斯的解吸和扩散。胡国忠等<sup>[11]</sup>研究得出:微波场能改变煤体的表面结构形态,使煤体产生局部损伤,并能提高煤体的瓦斯解吸与扩散能力。文献[12-13]试验研究了声波对煤体瓦斯扩散、渗透性的影响,得出声波对煤体的机械损伤效应和周期性振动作能够促进瓦斯的解吸和放散、提高煤层的渗透率。于国卿等<sup>[14]</sup>研究表明,超声波能致裂煤体,煤的微孔、中孔逐步连通形成大孔或裂隙,大孔的数量增加,煤体孔隙度增大。姜永东等<sup>[15-16]</sup>研究了声场作用下煤对甲烷的吸附特性、煤中甲烷的渗流特性,得出声场作用下煤吸附甲烷量减小,煤的渗透率增大,且功率越大效果更明显,并建立了声场作用下煤吸附甲烷模型、渗流方程。师庆民<sup>[17]</sup>研究得出:超声机械波和热在煤样中的传导具有各向异性,超声机械疲劳振动和空化作用形成的冲击水射流能致裂煤岩。综上所述,电场、声场、电磁场能改变煤体微观结构,影响煤吸附、解吸甲烷特性,增加煤的渗透率,但还处于基础研究阶段,未应用于现场,因此还需进一步开展深入的研究。笔者采用自主研发的超声波激励下煤吸附/解吸甲烷试验装置,试验研究不同功率的超声波作用煤中甲烷的解吸、扩散规律,进一步揭示超声波提高煤层气抽采率的机理。

## 1 试验设备与方法

试验煤样取自重庆渝阳煤矿和陕西黄陵矿业公司

二号煤矿,榆阳煤矿地质条件复杂,平均煤厚2.64 m,煤层瓦斯含量15.08~26.40 m<sup>3</sup>/t,瓦斯压力2.24~4.87 MPa,煤层渗透率为 $0.013 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,煤的水分2.87%、灰分14.77%、挥发分12.79%、固定碳69.59%;黄陵矿业公司二号煤矿地质条件较好,煤层厚度0.50~6.75 m,平均厚度4.8 m左右,煤质属于弱黏煤~气煤,煤中含有黏土类(1.7%)、碳酸盐类(2.9%)矿物,碳酸盐类矿物以方解石为主,煤的水分2.82%、灰分3.07%、挥发分30.98%、固定碳63.14%,煤层瓦斯含量6.59~7.17 m<sup>3</sup>/t,瓦斯压力1.21~1.80 MPa。

试验采用自主研发的超声波激励下煤吸附/解吸甲烷试验装置,如图1所示,该装置由超声波发生器、甲烷气瓶、吸附解吸缸、温度传感器、测量装置等5个部分组成,该装置能够测试不同功率、不同频率的超声波激励下煤吸附/解吸甲烷规律。装置水浴槽尺寸为800 mm×700 mm×450 mm的长方体,超声波换能器布置在水浴槽四周和底部,共分为3组(正面和背面、左面与右面、底面),每组由1台超声波发生器控制,功率为3 kW,总功率为9 kW,功率可调,超声波频率为25~40 kHz。换能器的布置方式可以让超声波沿水平和垂直方向传播,装置样品池放置在水浴槽中,样品池体积为φ50 mm×80 mm,可装约200 g煤粒,试验气压最大为15 MPa。试验时水浴槽装满水,换能器发射出的能量与波通过水介质传递给样品池,样品池中的水吸收声能,产生高频振动和温度升高,同时使样品池中的煤粉振动和升温,实现了不同功率、不同频率的超声波激励下煤吸附/解吸甲烷试验。



1—甲烷气瓶;2—配气缸;3—放水瓶(盐水)与量筒;4—换能器;5—温度传感器;  
6—样品池与煤样;7—超声波发生器;8—电脑;9—水浴槽;10—气压传感器;11—真空泵

图1 超声波激励煤吸附/解吸甲烷试验装置

Fig.1 Experimental device of methane adsorption/desorption on coal by acoustic wave stimulation

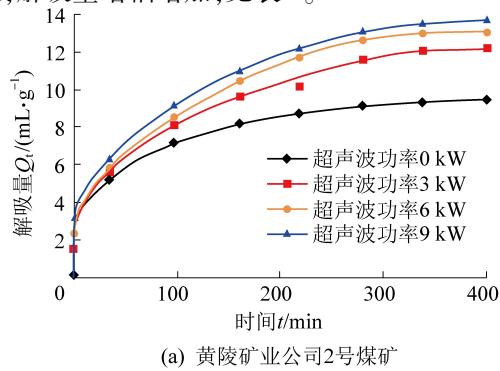
超声波激励下煤层气解吸试验步骤:①将现场取的新鲜煤块粉碎成煤粒,进行煤样工业分析,测定

煤的水分、灰分、挥发分、固定碳含量;②称取一定质量的煤粒放入样品池中,要求煤样装满样品池;③启

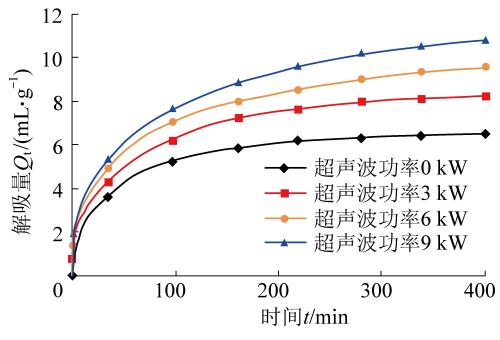
动真空泵对煤样抽真空8 h,使样品池达到真空状态,要求真空度达到4 Pa以下,然后向样品池中注入一定压力的甲烷,甲烷体积分数99.9%,使煤样吸附甲烷至达到吸附平衡;④将放水瓶中装4/5的饱和盐水,同时保持出水端与液面高度一致,用量筒测量排水量;⑤打开样品池管线中的高压阀,让样品池与大气接通30 s,放出游离甲烷,然后连接放水瓶端的橡皮管,测量不同时刻放水瓶排出到量筒中盐水的体积,通过计算可以得到甲烷解吸量与时间曲线;⑥在煤中甲烷解吸试验全过程中,开启超声波发生器,对煤样实施超声波激励。

## 2 超声波激励下煤中甲烷解吸试验

不同功率的超声波作用下煤中甲烷解吸试验条件:超声波频率为25 kHz,功率分别为0、3、6、9 kW,渝阳煤矿煤样吸附平衡甲烷压力为0.5 MPa,2号煤矿煤样吸附平衡甲烷压力为1 MPa。试验结果如图2所示,从图2中可以看出:不加超声波和加超声波激励2种状态下煤中甲烷的解吸量与时间曲线规律一致,在煤中甲烷解吸全过程中,甲烷的初始解吸速度较大,随着时间的慢慢增加,解吸速度逐渐减小,最终趋于0;超声波激励下煤中甲烷解吸量大于不加超声波,解吸量增加26.1%~65.6%,且超声波功率越大,解吸量增幅增加,见表1。



(a) 黄陵矿业公司2号煤矿



(b) 渝阳煤矿

Fig.2 Methane desorption characteristic in coal under different acoustic wave stimulation power

表1 不同功率超声波激励下煤中甲烷解吸量

Table 1 Methane desorption capacity in coal under different acoustic wave stimulation power

超声波功 率P/kW	解吸总量/(mL·g⁻¹)		解吸量增幅/%	
	渝阳煤矿	2号煤矿	渝阳煤矿	2号煤矿
0	6.54	9.50	—	—
3	8.25	12.13	26.1	27.7
6	9.54	13.07	45.8	37.5
9	10.83	13.71	65.6	44.3

## 3 超声波激励下煤中甲烷解吸扩散特性

### 3.1 超声波激励下煤中甲烷解吸特性

文献[18]研究得出,扩散模型能较好地反映煤中甲烷的解吸特性,该模型是基于煤屑煤层气扩散方程计算得到的解,其表达式为

$$Q_t = Q_\infty \sqrt{1 - e^{-Bt}} \quad (1)$$

式中:  $Q_t$  为不同时间煤层气的解吸量,  $\text{mL/g}$ ;  $Q_\infty$  为饱和解吸量,  $\text{mL/g}$ ;  $B$  为扩散参数,  $\text{min}^{-1}$ 。

根据图2中的试验数据,对式(1)进行了非线性拟合,拟合参数见表2,从表2中可以看出:超声波激励下饱和解吸量  $Q_\infty$  大于不加超声波的饱和解吸量,且饱和解吸量  $Q_\infty$  随超声波功率的增加而增大;解吸试验数据与扩散模型拟合曲线精度高(图3),误差很小,拟合相关系数在0.99以上,表明扩散模型能较好地反映煤中甲烷的解吸力学特性。

表2 扩散模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of diffusion model

煤样	功率/ kW	$Q_\infty /$ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$B /$ $\text{min}^{-1}$	相关系数 $r$
渝阳煤矿	0	6.537	0.011	0.999
	3	8.139	0.011	0.997
	6	9.413	0.010	0.993
	9	11.244	0.007	0.993
2号煤矿	0	9.571	0.009	0.992
	3	12.024	0.008	0.994
	6	13.035	0.008	0.991
	9	14.151	0.007	0.994

### 3.2 超声波激励下煤中甲烷扩散特性

将细小的煤颗粒体看作球形,球坐标下煤中甲烷扩散的物理数学模型<sup>[19]</sup>如下。

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} = D_F \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) \\ c = c_0 \frac{abP}{1 + bP} \quad (t = 0, 0 < r < r_0) \\ \left. \frac{\partial c}{\partial t} \right|_{r=0} = 0 \quad (t > 0) \\ -D_F \frac{\partial c}{\partial r} = \alpha(c - c_f) \Big|_{r=r_0} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $c$  为甲烷质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $D_F$  为扩散系数,  $\text{mm}^2/\text{min}$ ;  $r$  为煤粒半径,  $\text{m}$ ;  $c_0$  为初始平衡浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $r_0$  为煤粒半径,  $\text{m}$ ;  $a, b$  为 Langmuir 常数;  $P$  为气体压力,  $\text{Pa}$ ;  $\alpha$  为煤粒表面甲烷与游离甲烷的质交换系数,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $c_f$  为煤粒间裂隙中游离甲烷浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

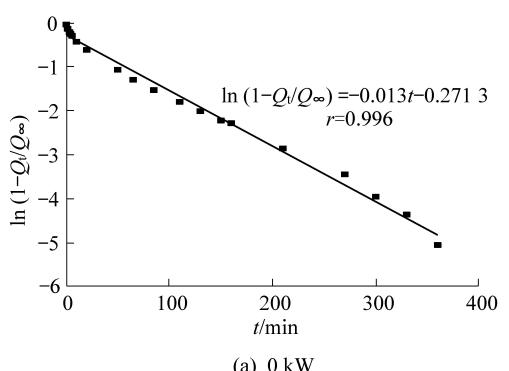
式(2)可以采用分离变量法求解,其解为

$$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -\lambda t + \ln A \quad (3)$$

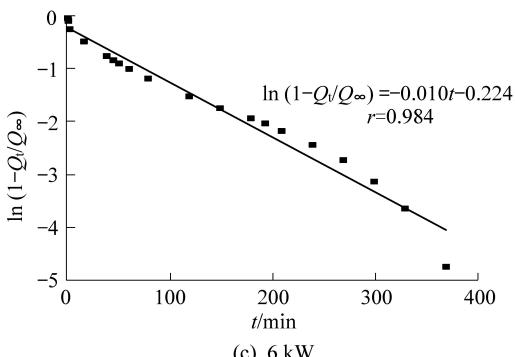
$$\begin{cases} A = \frac{6(\beta_1 \cos \beta_1 - \sin \beta_1)^2}{\beta_1^3(\beta_1 - \sin \beta_1 \cos \beta_1)} \\ \lambda = \frac{\beta_1^2}{r_0^2} D_F \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\beta_1$  为超越方程  $\tan \beta = \beta/(1 - \alpha r_0/D_F) = \beta/(1 - B'_i)$  系列解的一个解,  $B'_i = \alpha r_0/D_F$ ,  $B'_i$  为传质毕欧准数。  $A$  和  $\lambda$  均为拟合系数。

根据图 2 的试验数据,拟合得到了在不加超声波和加超声波激励下煤中甲烷扩散参数  $\lambda, A$  值,如图 4、图 5 所示,由图 4、图 5 可知,拟合精度高,相关系数在 0.96 以上,表明式(2)能较好地反映煤中甲烷扩散性质。表 3 是不同功率的超声波激励下煤中甲烷扩散参数计算值,从表 3 中可以看出,基于根据传热传质学理论,超声波激励下煤体内部扩散阻力

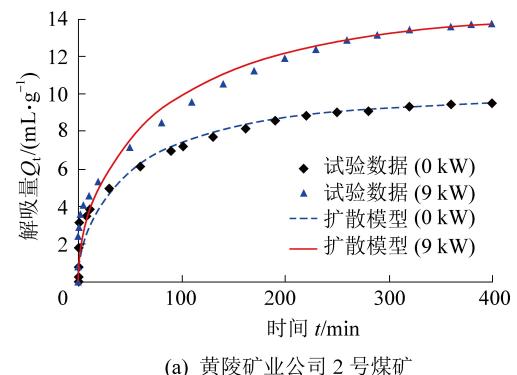


(a) 0 kW

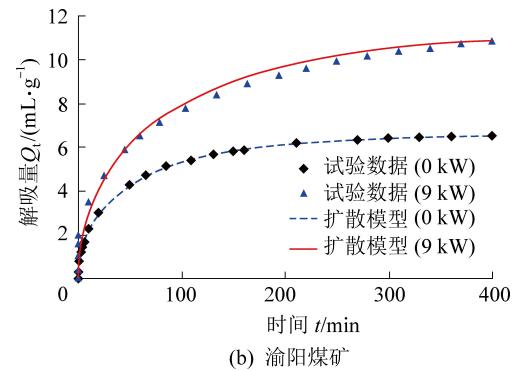


(c) 6 kW

减小,扩散能力增强,扩散系数  $D_F$  增大,表明超声波激励有利于甲烷扩散。



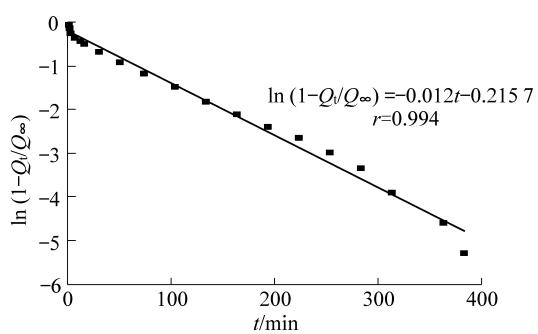
(a) 黄陵矿业公司 2号煤矿



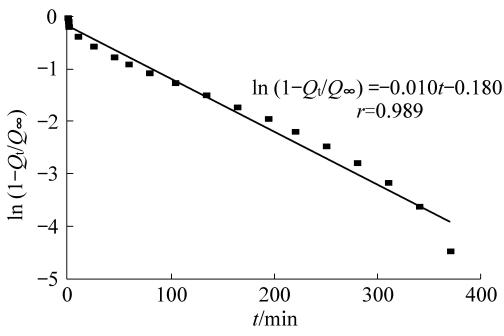
(b) 榆阳煤矿

图 3 试验数据与扩散模型拟合曲线

Fig.3 Fitting curves between experimental data and diffusion model



(b) 3 kW



(d) 9 kW

图 4 不同功率超声波激励下煤中甲烷扩散参数曲线(榆阳煤矿)

Fig.4 Methane diffusion parameter curves in coal under different acoustic wave stimulation power(Yuyang Coal Mine)

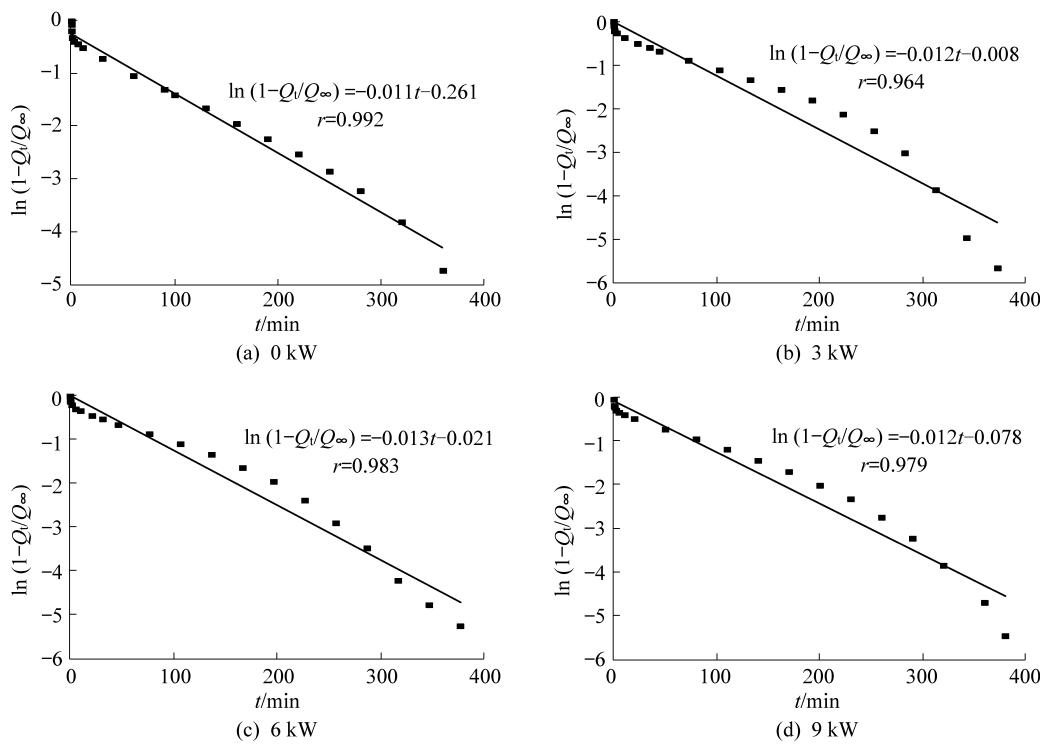


图5 不同功率超声波激励下煤中甲烷扩散参数曲线(2号煤矿)

Fig.5 Methane diffusion parameter curves in coal under different acoustic wave stimulation power (No.2 Coal Mine)

表3 不同功率的超声波激励下甲烷扩散参数

Table 3 Methane diffusion parameter in coal under different acoustic wave stimulation power

煤样	功率/ kW	$\lambda/$ $\text{min}^{-1}$	A	$D_F/$	相关系数 <i>r</i>
				$(10^{-5} \text{ mm}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	
渝阳 煤矿	0	0.013	0.762	18.178	0.996
	3	0.012	0.806	18.478	0.994
	6	0.010	0.799	18.988	0.984
	9	0.010	0.835	20.067	0.989
2号 煤矿	0	0.011	0.770	16.237	0.992
	3	0.012	0.992	75.291	0.964
	6	0.013	0.979	49.594	0.983
	9	0.012	0.925	26.973	0.979

此次试验,煤样含水量很少,渝阳煤矿为2.87%,2号煤矿为2.82%,因此超声波的空化效应不明显,试验过程中影响煤中甲烷解吸和扩散的主要因素是超声波的机械振动效应和热效应。水浴槽中水体的振动传递给煤粉,使细小的煤颗粒与甲烷产生不同的加速度和振幅,让固、气分离,使煤对甲烷的吸附能力减弱,促进甲烷的解吸和扩散;煤体吸收声能,温度升高,为甲烷解吸持续提供了能量,此次试验采用自主研发的另外一台可控超声波激励煤层气渗流试验装置,装置由6台超声波发生器组成,每台功率3 kW,装置总功率为18 kW,频率为25~40 kHz,功率18 kW超声激励下样品池中煤体温度增

加了21~24℃,如图6所示。另外温度升高,气体分子运动速度加快,使吸附的气体布朗运动加速,有利气体脱附。

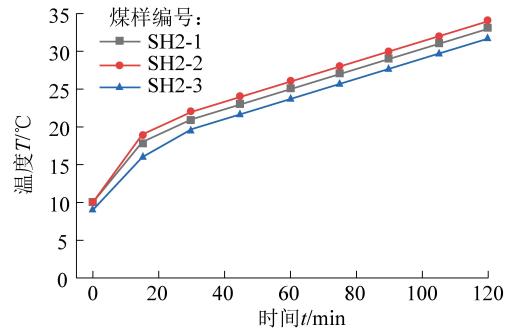


图6 煤样在超声波激励下温度与时间曲线

Fig.6 Curves of temperature and time of coal sample under ultrasonic incentive

## 4 结 论

1) 试验表明,超声波激励能提高煤层气的解吸量,且解吸量随超声波功率增大而增加。不加超声波和超声波激励下煤中甲烷的解吸力学规律相同,解吸规律遵循扩散模型。

2) 基于传热传质学理论,超声波激励下煤的传质毕欧数减小,扩散系数增大,表明超声波能促进煤中甲烷解吸、扩散。

3) 超声波的热效应使煤吸收声能,温度升高,为煤中甲烷解吸持续提供了能量。

## 参考文献(References):

- [1] 赵源,曹树刚,李勇,等.本煤层水压致裂增透范围分析[J].采矿与安全工程报,2015,32(4):644-651.  
ZHAO Yuan, CAO Shugang, LI Yong, et al. The analysis of antireflection range in coal seam hydraulic fracturing [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(4): 644-651.
- [2] 夏彬伟,杨冲,卢义玉,等.断层对煤层水力压裂裂缝扩展的影响[J].中国石油大学学报,2016,40(1):92-100.  
XIA Binwei, YANG Chong, LU Yiyu, et al. Effect of faults on hydraulic fracture propagation in coal seam [J]. Journal of China University of Petroleum, 2016, 40(1): 92-100.
- [3] 葛兆龙,梅绪东,贾亚杰,等.高压水射流割缝钻孔抽采影响半径研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):657-665.  
GE Zhaolong, MEI Xudong, JIA Yajie, et al. Influence radius of slotted borehole drainage by high pressure water jet [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4): 657-665.
- [4] 李志强,王兆丰.井下注气强化煤层气抽采效果的工程试验与数值模拟[J].重庆大学学报,2011,34(4):72-80.  
LI Zhiqiang, WANG Zhaofeng. Test and numerical simulation on effect of enhanced coalbed methane drawing by injecting gas under coal mine [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(4): 72-80.
- [5] 张超,林柏泉,周延,等.多缝线金属射流定向预裂爆破技术在瓦斯抽采中的应用[J].煤炭学报,2014,39(S1):100-104.  
ZHANG Chao, LIN Baiquan, ZHOU Yan, et al. Application of multi-seam metal jet directed pre-split blasting in gas extraction [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 100-104.
- [6] 蒋睿,王永清,李海涛,等.煤层倾角对煤层气水平井产能影响的数值模拟[J].煤炭学报,2015,40(S1):151-157.  
JIANG Rui, WANG Yongqing, LI Haitao, et al. A numerical simulation on the impact of coal seam dip on productivity of CBM horizontal well [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 151-157.
- [7] 张永民,邱爱慈,周海滨,等.面向化石能源开发的电爆炸冲击波技术研究进展[J].高电压技术,2016,42(4):1009-1017.  
ZHANG Yongmin, QIU Aici, ZHOU Haibin, et al. Research progress in electrical explosion shockwave technology for developing fossil energy [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1009-1017.
- [8] 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.  
LI Hengle, QIN Yong, ZHANG Yongmin, et al. Experimental study on the effect of strong repetitive pulse shockwave on the pore structure of fat coal [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 915-921.
- [9] 何学秋.交变电磁场对煤吸附瓦斯特性的影响[J].煤炭学报,1996,21(1):63-67.  
HE Xueqiu. The effect of alternative electromagnetic field on adsorption of gas by coal [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(1): 63-67.
- [10] 王恩元,张力,何学秋,等.煤体瓦斯渗透性的电场响应研究[J].中国矿业大学报,2004,33(1):62-66.  
WANG Enyuan, ZHANG Li, HE Xueqiu, et al. Electric field response of gas permeability of coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(1): 62-66.
- [11] 胡国忠,朱怡然,许家林,等.可控源微波场强化煤体瓦斯解吸扩散的机理研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(3):480-485.  
HU Guozhong, ZHU Yiran, XU Jialin, et al. Mechanism of the controlled microwave field enhancing gas desorption and diffusion in coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 480-485.
- [12] 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):1672-1926.  
ZHAO Lijuan, QIN Yong. Experiment on improving the permeability of coal reservoir under ultrasound [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 1672-1926.
- [13] 李建楼,严家平,王来斌,等.煤体瓦斯在声波场作用下的放散特征研究[J].煤炭学报,2012,37(2):264-268.  
LI Jianlou, YAN Jiaping, WANG Laibin, et al. Study of characteristics of coal gas radiation in acoustic field [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 264-268.
- [14] 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):264-271.  
YU Guoqing, ZHAI Cheng, QIN Lei, et al. Changes to coal pores by ultrasonic wave excitation of different power [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(2): 264-271.
- [15] 姜永东,阳兴洋,鲜学福,等.应力场、温度场、声场作用下煤层气的渗流方程[J].煤炭学报,2010,35(3):434-439.  
JIANG Yongdong, YANG Xingyang, XIAN Xuefu, et al. The infiltration equation of coal bed under the cooperation of stress field temperature field and sound field [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 434-439.
- [16] 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):155-160.  
JIANG Yongdong, SONG Xiao, LIU Hao, et al. Adsorption model and law of methane under the effect of high-power acoustic wave [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 155-160.
- [17] 师庆民.超声波加载煤岩物性响应及其作用机理[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [18] JIANG Yongdong, SONG Xiao, LIU Hao. Laboratory measurements of methane desorption on coal during acoustic stimulation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015 (78): 10-18.
- [19] 聂百胜,王恩元,郭勇义.煤粒瓦斯扩散的数学物理模型[J].辽宁工程技术大学学报,1999,18(6):582-585.  
NIE Baisheng, WANG Enyuan, GUO Yongyi. Mathematical and physical model of gas diffusion through coal particles [J]. Journal of Liaoning Technical University, 1999, 18(6): 582-585.