

8-25-2019

## Effect of NMR technology-based ultrasonic frequency on stimulated cracking of coal

MA Huiteng

*School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China National; Engineering Research Center for Coal Mine Gas Control, Xuzhou 221116, China*

ZHAI Cheng

*School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China National; Engineering Research Center for Coal Mine Gas Control, Xuzhou 221116, China, greatzc@126.com*

XU Jizhao

*School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China National; Engineering Research Center for Coal Mine Gas Control, Xuzhou 221116, China*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

---

### Recommended Citation

MA Huiteng, ZHAI Cheng, XU Jizhao, et al. (2019) "Effect of NMR technology-based ultrasonic frequency on stimulated cracking of coal," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 8.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.007

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/8>

This Coal Geology, Mine Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact [380940179@qq.com](mailto:380940179@qq.com).

---

# Effect of NMR technology-based ultrasonic frequency on stimulated cracking of coal

## Authors

MA Huiteng, ZHAI Cheng, XU Jizhao, and SUN Yong

文章编号: 1001-1986(2019)04-0038-07

# 基于 NMR 技术的超声波频率对煤体激励致裂效果的影响

马会腾<sup>1,2</sup>, 翟成<sup>1,2</sup>, 徐吉钊<sup>1,2</sup>, 孙勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116;  
2. 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为了深入研究超声波频率对煤体激励致裂效果的影响, 利用超声波发生仪对原始煤样进行致裂实验, 并利用低场核磁共振设备 NMR 设备对煤样进行测量, 通过分析弛豫时间  $T_2$  曲线, 深入研究煤样致裂前后孔隙结构的变化。研究表明: 超声波可以有效改善煤体的孔隙结构, 经超声波激励致裂后, 煤样内部的孔隙数量增多, 总孔隙率、有效孔隙率及渗透率均明显增大; 同时, 煤样内部小孔数量的增长率与超声波频率呈负相关关系, 中孔和大孔数量、总孔隙率增长率、有效孔隙率及渗透率的增长率与超声波频率均呈正相关关系。研究结果为煤储层超声波致裂增透技术奠定理论基础。



**关键词:** 低场核磁共振设备 NMR; 超声波; 孔隙数量; 总孔隙率; 有效孔隙率; 渗透率

**中图分类号:** X93 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.007

## Effect of NMR technology-based ultrasonic frequency on stimulated cracking of coal

MA Huiteng<sup>1,2</sup>, ZHAI Cheng<sup>1,2</sup>, XU Jizhao<sup>1,2</sup>, SUN Yong<sup>1,2</sup>

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;  
2. National Engineering Research Center for Coal Mine Gas Control, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to further study the effect of ultrasonic frequency on the stimulated cracking effect of coal, the paper conducted the crack experiment on the original coal samples by using the ultrasonic generation meter, and measured the coal by using the NMR equipment through analyzing the  $T_2$  curve, the changes of pore structure before and after coal sample cracking were deeply studied. The results show that the pore structure of coal can be effectively improved by the ultrasonic wave. After the crack induced by the ultrasonic wave, the pore quantity inside the coal increased and the total porosity, effective porosity and permeability all increased significantly. Meanwhile, the growth rate of the number of small pores in coal is negatively correlated with the frequency of ultrasonic wave, and the growth rate of the number of medium and large pores, total porosity, effective porosity and permeability are positively correlated with the frequency of ultrasonic wave. The results of this study provide a good theoretical value for ultrasonic stimulation to crack coal seam and reduce the difficulty of coal seam gas extraction.

**Keywords:** NMR; Ultrasound; pore quantity; total porosity; effective porosity; permeability

我国煤矿区煤层气储量十分丰富, 据统计, 煤层气含量超过  $10 \text{ m}^3/\text{t}$  的煤矿占到了煤矿总数的  $41\%$ <sup>[1-3]</sup>。但随着我国煤炭资源开采逐渐走向深部,

煤储层的渗透性也在逐渐降低, 成为煤层气排采亟需解决的技术性难题。超声波致裂技术是一种新兴的增透技术。近年来, 国内外学者针对超声波增透

收稿日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51774278); 江苏省杰出青年基金项目(BK20170001); 国家重点研发计划课题(2018YFC0808403); 江苏省第五期“333 高层次人才培养工程”(BRA2018032)

**Foundation item:** The General Program of the National Natural Science Foundation of China(51774278); The Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Jiangsu Province(BK20170001); National Key R&D Program of China(2018YFC0808403); the Fifth 333 High-level Talents Training Project of Jiangsu Province(BRA2018032)

第一作者简介: 马会腾, 1994 年生, 男, 山东邹城人, 硕士研究生, 从事超声波激励致裂煤体方面的研究工作。E-mail: teng94\_22@163.com

通信作者: 翟成, 1978 年生, 男, 山东滕州人, 教授, 博导, 从事矿井瓦斯防治与利用方面的研究工作。E-mail: greatzc@126.com

引用格式: 马会腾, 翟成, 徐吉钊, 等. 基于 NMR 技术的超声波频率对煤体激励致裂效果的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 38-44.  
MA Huiteng, ZHAI Cheng, XU Jizhao, et al. Effect of NMR technology-based ultrasonic frequency on stimulated cracking of coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 38-44.

技术做了大量研究。20 世纪 50 年代, 美国和苏联尝试利用超声波促进石油增产并取得了良好的效果, 其中, M. S. Mullakaev<sup>[4]</sup>开发了一种超声波设备, 并在美国油田进行现场测试, 实践证明可有效促进石油增产。Liu Ting 等<sup>[5]</sup>、鲜学福<sup>[6]</sup>率先提出了利用超声波激励煤层促进煤层气增产的思想; 赵丽娟等<sup>[7]</sup>针对超声波激励后煤岩的渗透率进行了研究, 认为超声波激励可以改善煤岩渗透率; 聂百胜等<sup>[8]</sup>研究了超声波对煤岩孔隙率的影响; 赵鑫等<sup>[9]</sup>利用数值模拟技术对超声波的机械振动进行了深入研究; 肖晓春等<sup>[10]</sup>建立了超声波激励煤层后甲烷渗透率修正公式; 李建楼等<sup>[11-12]</sup>研究了声波场作用含瓦斯煤体时的应力演化规律以及瓦斯吸附特性。

上述研究证明了超声波技术可以用于煤层致裂增透, 但针对不同超声波频率对煤体内部孔隙结构的影响规律研究较少, 因此, 笔者借助低场核磁共振设备(NMR), 从孔隙数量、孔隙率、有效孔隙率和渗透率 4 个方面研究超声波作用过程中煤样内部的孔隙结构变化, 从微观角度分析超声波对煤样的致裂效果。

## 1 超声波致裂增透实验

### 1.1 煤样制备

实验所用煤样取自山西省恒益煤矿。将煤块从煤层中钻取出来密封包装运送至实验室。利用岩心钻取机钻取高度 50 mm、直径 25 mm 的煤样若干个, 从中挑选出完整性较好, 无明显裂隙的煤样 5 个。将所选煤样用保鲜膜密封以保持其原有特性。并对煤样进行了工业分析, 分析基准均为空气干燥基, 结果如表 1 所示。

表 1 煤样工业分析和孔隙率

Table 1 Proximate analysis and porosity of coal samples

煤样 编号	工业分析/%				孔隙率/%
	水分	灰分	挥发分	固定碳	
1	13.22	15.70	54.88	22.37	11.11
2	12.01	14.99	53.97	22.09	11.28
3	11.87	14.82	54.84	21.58	11.57
4	11.96	15.24	55.21	21.71	11.40
5	13.22	14.79	55.57	21.48	11.01

### 1.2 实验仪器及条件

a. 低场核磁共振分析仪 设备主磁场 0.15 T, H 质子共振频率 21.7 MHz, 射频脉冲频率 1.0~49.9 MHz, 磁体控温 25~35℃, 磁体均匀度  $12.0 \times 10^{-6}$ , 射频功率 300 W。

b. 超声波发生仪 设备型号为 GBP-US2021A,

由超声波发生器、固定支架、振子以及显示器组成。工作频率为 20~30 kHz, 最大输出功率 1 000 W, 运行环境温度为 0~45℃, 可较长时间工作。

c. 真空饱水装置和离心机。

### 1.3 实验流程

对煤样进行编号(1—5 号), 利用真空饱水装置将煤样饱水 24 h 后取出, 记录煤样质量, 利用电子游标卡尺测量煤样高度与直径。最后利用 NMR 分别测出 5 个煤样的饱水弛豫时间  $T_2$  曲线。

把煤样置于离心机中离心 10 min, 离心机转速为 2 000 r/min。测量煤样质量, 利用 NMR 测出 5 个煤样的离心弛豫时间  $T_2$  曲线。

利用真空饱水装置对煤样饱水 24 h。

将饱水后的 1—5 号煤样分别在 26 kHz、27 kHz、28 kHz、29 kHz、30 kHz 的频率下利用超声波发生仪致裂 1 h。在致裂时, 为防止煤样破碎而影响后续实验结果, 需将与超声波发射端接触的煤样端面以及部分侧表面用胶带缠绕。

将致裂后的煤样饱水 24 h, 利用 NMR 测出 5 个煤样致裂后的饱水弛豫时间  $T_2$  曲线。

利用离心机将煤样离心 10 min 去除自由水, 再利用 NMR 测出 5 个煤样致裂后的离心弛豫时间  $T_2$  曲线。

## 2 实验结果及讨论

利用超声波发生仪对煤样激励 1 h 后, 与超声波发射端接触的煤样端面出现了明显的裂缝, 并且随着超声波频率的增高, 煤样端面的裂缝发育程度增加, 当超声波频率达到 30 kHz 时, 宏观上可见煤样端面出现明显的破碎现象, 致裂效果显著(图 1)。

### 2.1 孔隙数量

为了进一步探究超声波对煤样的致裂效果, 利用低场核磁共振(NMR)对超声波作用前后的煤样进行测量。NMR 是通过测量煤样孔隙中水分的 H 质子来检测煤体内部的孔隙孔径情况。弛豫时间  $T_2$  与煤样内部孔隙半径  $r$  的关系<sup>[13-14]</sup>为:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \left( \frac{S}{V} \right)_{\text{pore}} = \frac{\rho}{r} F_s \quad (1)$$

式中  $\rho$  为横向表面弛豫强度;  $S$  为孔隙表面积;  $V$  为孔隙体积;  $F_s$  为几何形状因子;  $r$  为孔隙半径。

$T_2$  曲线与煤样孔径分布曲线具有一致性: 即  $T_2$  越大, 孔径越大;  $T_2$  谱信号强度越高, 对应孔径的孔隙数量就越多<sup>[15-16]</sup>。实验中选取频率为 26~30 kHz 的超声波对煤样进行致裂, 致裂前后的饱水  $T_2$  曲线如图 2 所示。

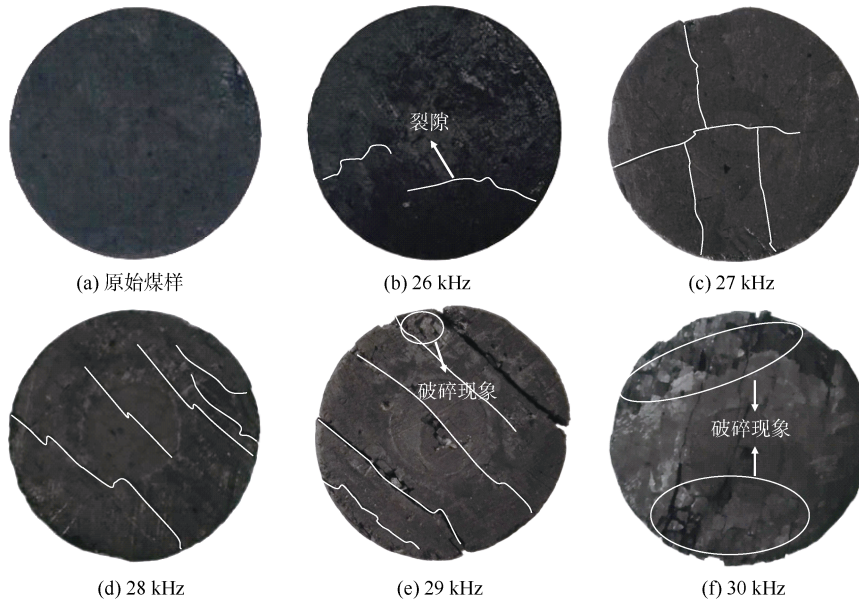


图 1 不同频率超声波煤样致裂效果

Fig.1 Effect of cracking stimulated by ultrasonic wave of different frequencies

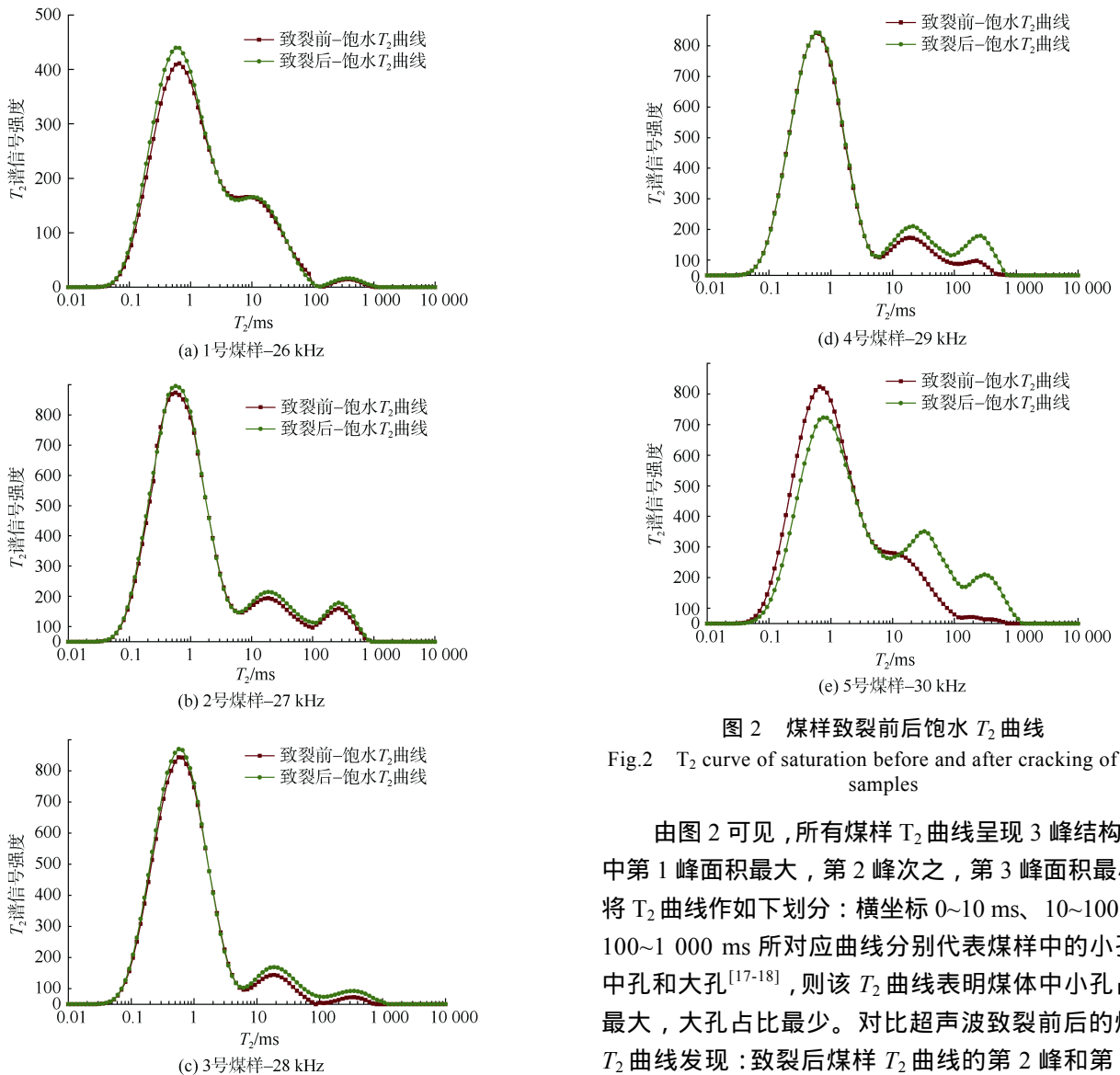


图 2 煤样致裂前后饱水  $T_2$  曲线

Fig.2  $T_2$  curve of saturation before and after cracking of coal samples

由图 2 可见，所有煤样  $T_2$  曲线呈现 3 峰结构，其中第 1 峰面积最大，第 2 峰次之，第 3 峰面积最小，将  $T_2$  曲线作如下划分：横坐标 0~10 ms、10~100 ms、100~1 000 ms 所对应曲线分别代表煤样中的小孔、中孔和大孔<sup>[17-18]</sup>，则该  $T_2$  曲线表明煤体中小孔占比最大，大孔占比最少。对比超声波致裂前后的煤样  $T_2$  曲线发现：致裂后煤样  $T_2$  曲线的第 2 峰和第 3 峰

一般高于致裂前, 而第 1 峰变化较小, 这说明超声波有效改善了煤样内部的孔隙结构, 且对中孔和大孔的影响更加显著。对比不同频率下致裂结果发现: 随着超声波频率的增高, 第 2 峰和第 3 峰振幅的增幅增大, 而第 1 峰的振幅与超声波频率呈现负相关关系, 这是因为在低频率下超声波的空化效应使煤样产生了新的小孔, 但随着超声波频率的增高, 热效应逐渐在致裂过程占据主导地位, 使得小孔逐渐

扩展为中孔和大孔, 并且孔隙之间更加贯通, 最终形成裂隙网络。如前所述,  $T_2$  曲线信号强度越高, 孔隙数量越多, 分别将 0~10 ms、10~100 ms 和 100~1 000 ms 所对应曲线进行积分, 所得面积便可视作对应孔径孔隙的数量。1-5 号煤样分别经过 26~30 kHz 的超声波致裂后, 小孔、中孔及大孔的数量出现明显变化(表 2)。图 3 为小孔、中孔和大孔在不同频率下孔隙数量增幅拟合曲线。

表 2 煤样致裂前后孔隙数量变化  
Table 2 Change of the number of pores before and after coal cracking

煤样	致裂前孔隙数量			致裂后孔隙数量增幅/%		
	小孔	中孔	大孔	小孔	中孔	大孔
1	7 516	1 501	505	15.7	2.2	1.6
2	15 520	3 617	2 211	6.5	10.9	13.4
3	14 250	2 520	630	4.1	25.8	107.8
4	14 964	3 120	1 450	0.5	39.5	198.6
5	13 460	4 486	2 571	-15.9	82.5	507.1

注: 积分所得面积视为孔隙数量, 无实际单位。

由图 3 可以看出, 煤样中的大孔数量增长率与超声波频率呈二次函数增长关系, 中孔数量增长率与超声波频率呈线性增长关系, 而小孔数量增长率与超声波频率呈负相关关系, 且在 30 kHz 时出现负增长现象。结合实验数据可知, 大孔数量增幅十分明显, 最大达到 507.1%, 中孔数量增幅最大达到 82.5%, 而小孔数量增幅最大仅有 15.7%。分析表明, 超声波对大孔和中孔数量的优化最明显, 频率越高, 二者的增长率越高。然而, 超声波没有明显提高小孔数量, 这可能是由于小孔逐渐演化为更大尺寸的孔隙所致。因此, 在超声波致裂过程中, 应当尽可能提高其频率以增强致裂效果, 这样, 大尺寸孔隙数量的增加以及裂隙的形成有助于煤层气在储层中的运移和产出。

### 2.2 总孔隙率及有效孔隙率

孔隙率是指块状材料中孔隙体积占材料在自然状态下总体积的百分比, 可以划分为有效孔隙率及残余孔隙率, 其中, 多孔介质内相互连通的微小孔隙的总体积与该多孔介质的外表体积的比值称为有效孔隙率; 多孔介质内相通的和不相通的所有微小孔隙的总体积与该多孔介质的外表体积的比值称为绝对孔隙率或总孔隙率。由于总孔隙率中包含能够束缚气体的封闭孔隙, 则有效孔隙率所反映出的煤层气渗流能力更加精确。

总孔隙率的测量一般采用称质量法。首先, 在真空条件下对煤样进行饱水处理, 使煤样内部充满水后称其质量  $m_f$ ; 然后, 对煤样进行干燥, 使其内部水分蒸发后称其质量  $m_d$ ; 最后用电子游标卡尺测得煤体高度  $h$  与直径  $d$  求其体积  $V$ 。利用式(2)<sup>[19]</sup>便可求得煤样的总孔隙率  $\phi_t$ 。

$$\begin{cases} \phi_t = \frac{m_f - m_d}{V} \\ V = h \cdot \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

测量结果显示, 当超声波频率较低时煤样的总孔隙率增幅较小, 随着超声波频率的增加, 煤样的总孔隙率增幅也在逐渐增大。

由表 3 看出, 经过频率为 26~30 kHz 的超声波致裂后, 1-5 号煤样的总孔隙率均有所增大, 并且随着超声波频率的增高, 总孔隙率的增幅也在逐渐增大。总孔隙率的增长可能是由于高频率的声波增

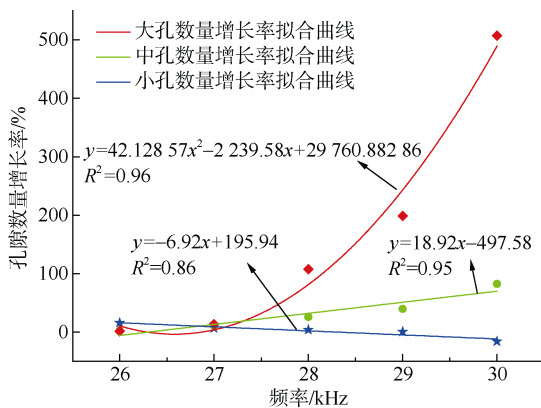


图 3 不同超声波频率下孔隙数量增幅曲线

Fig.3 Variation of pore increase in different ultrasonic frequencies

强了煤样内部水分的空化作用，使煤样内部生成了更多孔隙，即封闭孔隙率的增长占据了主导地位，也可能是由于高频率的声波所带来的能量使煤样内部孔隙产生扩展、连通，形成裂隙网络，即有效孔隙率的增长占据主导地位。有效孔隙率的增长是煤层气渗流能力增强的直观体现，因此，需要进一步探究煤样致裂前后有效孔隙率的变化情况。

利用 NMR 测得的  $T_2$  曲线测量有效孔隙率。将  $T_2$  曲线转化为累积孔隙率曲线，并结合煤样的总孔隙率便可以求出煤体的有效孔隙率，计算公式<sup>[20]</sup>为：

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

式中 FFI 是煤样中自由流体值，是饱水状态下的累积孔隙率曲线与  $x$  轴所围成的封闭区域面积 ( $\text{FFI} = \int_{0.01}^{10000} f_1 dx$ ,  $f_1$  是饱水状态下的累积孔隙率曲线)；BVI 是煤样的束缚流体值，是离心条件下累积孔隙率曲线与  $x$  轴围成的封闭区域面积 ( $\text{BVI} = \int_{0.01}^{10000} f_2 dx$ ,  $f_2$  是离心状态下的累积孔隙率曲线)。

煤样致裂前后累积孔隙率曲线如图 4 所示，由图中可以看出，致裂后的煤样在离心状态下  $T_2$  曲线明显降低，这是因为煤样内部孔隙逐渐贯通形成相互连通的裂隙，内部的自由水在离心时被甩出所致。过离心累积孔隙率曲线引直线交饱水累积孔隙率曲线于一点，过该点作垂线与  $x$  轴相交，交点称为  $T_2$  截止值， $T_2$  截止值可以将煤样内部的水划分为自由水和束缚水，该值越小代表自由水比例越大，那么

煤样中相互连通的孔隙体积占比越高。由图 4 可见，致裂前  $T_2$  截止值为 1，致裂后降低为 0.582 2，可以定性地认为煤样致裂后有效孔隙率明显升高。由式(3)计算所得的有效孔隙率见表 3。

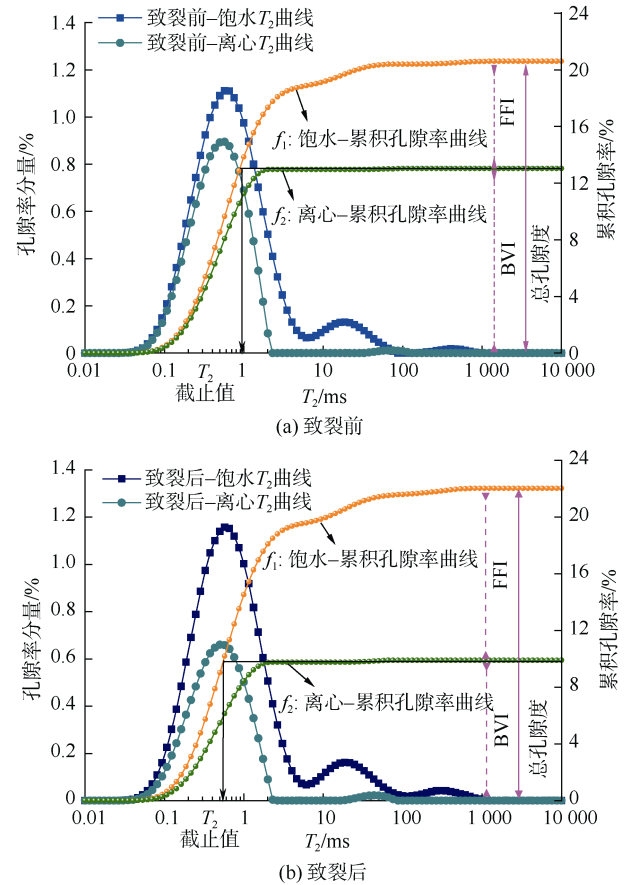


图 4 煤样致裂前后累积孔隙度曲线

Fig.4 Cumulative porosity curve of coal before and after cracking

表 3 煤样致裂前后总孔隙率与有效孔隙率变化

Table 3 Changes of total porosity and effective porosity before and after coal cracking

煤样编号	总孔隙率/%			有效孔隙率/%		
	致裂前	致裂后	增幅	致裂前	致裂后	增幅
1	11.11	12.35	11.16	6.77	8.23	21.57
2	11.28	13.15	16.58	7.02	9.42	34.15
3	11.57	14.24	23.08	7.51	11.87	58.04
4	11.40	17.11	50.09	7.29	13.84	89.85
5	11.01	18.01	63.58	6.98	14.08	101.76

由表 3 可以看出，经过超声波致裂后，1—5 号煤样的有效孔隙率均有所增大，并且有效孔隙率增幅随着超声波频率的增高而逐渐增大。可见超声波不仅能够有效改善煤样的总孔隙率，而且可以有效提高煤样的有效孔隙率。并且超声波频率越高，对煤体内部孔隙结构的改善越明显。分析其原因：随着超声波的频率增高，煤体内部的空化作用以及机械振动越强，

不仅使其内部产生新孔隙，更主要的是些封闭孔隙在超声波的作用下逐渐相互连通，成为煤层气自由运移的通道，从而有效提高煤层气在煤层中的渗流能力。图 5 是煤样经过不同频率的超声波激励致裂后总孔隙率和有效孔隙率增长率拟合曲线，其中有效孔隙率增长率以线性函数递增，总孔隙率增长率以二次函数递增，二者拟合度均达到 0.96。

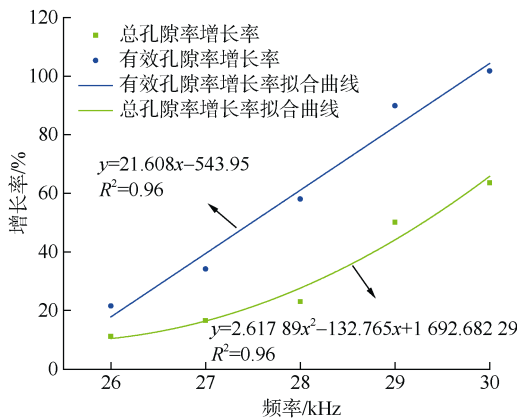


图 5 总孔隙率及有效孔隙率的增长率

Fig.5 Increase rate of total porosity and effective porosity

### 2.3 渗透率

煤体的渗透率大小与其内部孔隙的大小以及孔隙之间的连通性密切相关, 所以渗透率是评价煤层气可采性的重要指标之一。渗透率越大, 则煤层中的煤层气越容易流动, 抽采效果越好。根据 SDR 模型<sup>[21]</sup>, 可以得到煤体渗透率的增长率计算公式:

$$\begin{cases} \Delta k = \frac{k_1 - k_0}{k_0} = \frac{B\varphi_{e1}^4 T_{2g1}^4 - B\varphi_{e0}^4 T_{2g0}^2}{B\varphi_{e0}^4 T_{2g0}^2} = \frac{\varphi_{e1}^4 T_{2g1}^2}{\varphi_{e0}^4 T_{2g0}^2} - 1 \\ T_{2g}^2 = \exp\left(\sum_{T_{2s}}^{T_{2max}} \frac{A_i}{A_T} \ln(T_{2i})\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $B$  为常数, 与多孔介质有关;  $T_{2g0}$ 、 $T_{2g1}$  分别为煤样致裂前、后  $T_2$  曲线的几何平均值, 该值可由 NMR 设备直接测出;  $\varphi_{e0}$ 、 $\varphi_{e1}$  分别为煤样致裂前、后的有效孔隙率;  $T_{2s}$  为  $T_2$  曲线开始时的  $T_2$  值, ms;  $T_{2max}$  为  $T_2$  曲线结束时的  $T_2$  值, ms;  $A_T$  是  $T_2$  曲线累积信号强度;  $A_i$  是  $T_{2i}$  处的信号强度;  $T_{2i}$  是  $A_i$  处对应的  $T_2$  值, ms。

煤样经不同频率超声波致裂后渗透率增长率拟合曲线如图 6 所示, 由图中可见, 煤样渗透率增幅随超声波频率以二次函数递增, 拟合度为 0.98。超

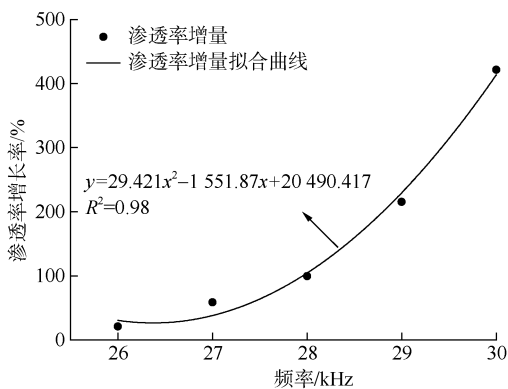


图 6 煤样致裂后渗透率增长率

Fig.6 Increase rate of permeability after cracking of coal

声波频率为 26~30 kHz 时, 1—5 号煤样的渗透率增长率分别为 21.2%、58.7%、99.7%、215.4% 和 421.5%。这进一步表明超声波能够增强煤储层的渗透性, 在钻孔排采负压作用下, 煤层气的渗流阻力减少, 渗流通道更为通畅, 从而提高煤层气排采量和效率。

### 3 结论

a. 超声波可以有效改善煤体孔隙结构, 经过超声波激励后, 煤样的小孔、中孔和大孔数量均有明显增多。随着超声波频率的增大, 中孔和大孔孔隙数量增长率逐渐增大, 而小孔孔隙数量增长率逐渐减小。

b. 经过超声波激励后, 煤体的总孔隙率及有效孔隙率都明显增大, 并且二者的增长率随超声波频率的增高而增大。有效孔隙率的增长率与超声波频率呈线性函数关系, 总孔隙率的增长率与超声波频率呈二次函数关系。

c. 超声波可以显著提高煤体的渗透率, 随着超声波频率的增高, 煤体的渗透率增长率逐渐增大, 二者呈二次函数关系, 说明煤体的孔隙之间更加贯通, 有利于煤层气排采。

### 参考文献

- [1] XU Jizhao, ZHAI Cheng, QIN Lei, et al. Mechanism and application of pulse hydraulic fracturing in improving drainage of coalbed methane[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 40: 79-90.
- [2] CAI Yidong, LIU Dameng, PAN Zhenjun, et al. Pore structure and its impact on CH<sub>4</sub> adsorption capacity and flow capability of bituminous and subbituminous coals from northeast China[J]. Fuel, 2013, 103: 258-268.
- [3] ZHANG Songhang, TANG Shuheng, ZHENG Qian, et al. Evaluation of geological features for deep coalbed methane reservoirs in the Dacheng Salient, Jizhong depression, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 133: 60-71.
- [4] MULLAKAEV M S, ABRAMOV V O, ABRAMOVA A V. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 125: 201-208.
- [5] LIU Ting, LIN Baiquan, YANG Wei, et al. Dynamic diffusion-based multifield coupling model for gas drainage[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 44: 233-249.
- [6] 鲜学福. 我国煤层气开采利用现状及其产业化展望[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(增刊 1): 1-5.  
XIAN Xuefu. Present situation of exploitation and utilization of coalbed methane and prospect of industrialization in China[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2000, 23(S1): 1-5.
- [7] 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.
- ZHAO Lijuan, QIN Yong. Experiment on improving the permeability of coal reservoir under ultrasound[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 747-752.
- [8] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 功率声波影响煤层甲烷储运的初步探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(6): 23-26.
- NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Monitor study on broken floor depth caused by underground pressure[J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(6): 23-26.
- [9] 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.
- [10] 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): 1726-1733.
- 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): 1726-1733.
- [11] 李建楼, 严家平, 王来斌, 等. 煤体瓦斯在声波场作用下的分散特征研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 264-267.
- 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): 264-267.
- [12] 李建楼, 严家平, 胡水根, 等. 气体压力对煤体瓦斯渗透特征的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 307-310.
- LI Jianlou, YAN Jiaping, HU Shuigen, et al. Effect of gas pressure on infiltration characteristics of coal gas[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(2): 307-310.
- [13] LI Jieli, KAUNDA R B, ZHOU Keping. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 154: 133-141.
- [14] COHEN M H, MENDELSON K S. Nuclear magnetic relaxation and the internal geometry of sedimentary rocks[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(2): 1127-1135.
- [15] CAI Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 507-517.
- [16] 郑司建, 姚艳斌, 蔡益栋, 等. 准噶尔盆地南缘低煤阶煤储层可动流体及孔径分布特征[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(1): 56-60.
- ZHENG Sijian, YAO Yanbin, CAI Yidong, et al. Characteristics of movable fluid and pore size distribution of low rank coals reservoir in southern margin of Junggar basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(1): 56-60.
- [17] YAO Yanbin, LIU Dameng, CHE Yao, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR)[J]. Fuel, 2010, 89(7): 1371-1380.
- [18] YAO Yanbin, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(6): 854-862.
- [19] XU Jizhao, ZHAI Cheng, LIU Shimin, et al. Feasibility investigation of cryogenic effect from liquid carbon dioxide multi cycle fracturing technology in coalbed methane recovery[J]. Fuel, 2017, 206: 371-380.
- [20] CAI Yidong, LIU Dameng, PAN Zhejun, et al. Petrophysical characterization of Chinese coal cores with heat treatment by nuclear magnetic resonance[J]. Fuel, 2013, 108: 292-302.
- [21] WESTPHAL H, SURHOLT I, KIESL C, et al. NMR measurements in carbonate rocks: Problems and an approach to a solution[J]. Pure and Applied Geophysics, 2005, 162(3): 549-570.

(责任编辑 范章群)