

功率超声影响的煤中甲烷气促解规律实验研究

肖晓春¹, 徐 军¹, 潘一山¹, 吕祥锋², 杨新乐^{1,3}, 朱洪伟¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;
3. 太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 功率超声激励促解煤层甲烷气是一种不受储层地质条件和气源特性限制, 具有普遍应用价值的增采技术。通过 CT 观测实验, 对超声波作用下煤样不同尺度裂隙发展规律进行深入分析, 从微观上揭示功率超声促解机制。在对比促解实验测定结果的基础上, 研究功率超声作用煤样解吸量变化规律。研究表明: CT 观测实验很好地证明了超声的机械震碎作用; 在功率超声激励作用下, 煤样裂隙条数显著增多, 贯通裂隙增多且单条裂纹最大宽度显著增大; 超声波作用后煤中甲烷气的解吸量有显著提高, 建立超声声强参数影响的煤中甲烷气解吸量随解吸时间变化的修正公式。由修正公式拟合结果可知: 煤中甲烷气饱和吸附后的解吸量 α 和 α_1 均随孔隙压力的增加而增大, 相同孔隙压力下的甲烷气饱和吸附解吸量 α_1 大于无超声作用时的解吸量 α , 其原因在于在功率超声的声场强度影响下, 煤质点的动能和位能增加, 煤表面甚至基质内部吸附的甲烷更容易脱附变成游离态, 从而达到煤层甲烷气促解作用。

关键词: 气田开发与开采; 超声激励; 尺度效应; CT; 促解

中图分类号: TE 377

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)01-0065-07

EXPERIMENTAL STUDY OF PROMOTING METHANE DESORPTION LAW IN COAL CONSIDERING POWER ULTRASOUND EFFECT

XIAO Xiaochun¹, XU Jun¹, PAN Yishan¹, LU Xiangfeng², YANG Xinle^{1,3}, ZHU Hongwei¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Power ultrasonic incentive promoting desorption of methane in coal seam is a kind of general applicable value technology, which is out of limit controlled by reservoir geologic conditions and source gas characteristics. Through CT observation and promoting desorption experiment, the rule of coal samples different scales fracture development is analyzed considering ultrasonic effect, from microscopy to reveal the power ultrasonic promoting desorption mechanism. In contrast to the experimental determination of promoting desorption results, the rule of gas desorption quantity in coal sample changing with time by power ultrasonic action is studied. Research results show that: CT observation is the good proof that the ultrasonic mechanical shatter role. In the power ultrasonic incentive effect, the number of coal sample fracture significantly increased; transfixion crack increased and a single crack maximum width increased significantly; methane desorption

收稿日期: 2012-07-27; **修回日期:** 2012-09-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226803); 国家自然科学基金青年基金项目(51004061); 2011 年辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2011049)

作者简介: 肖晓春(1979-), 男, 博士, 2002 年毕业于辽宁工程技术大学力学与工程科学系理论与应用力学专业, 现任副教授, 主要从事煤层气渗流及增采机制方面的教学与研究工作。E-mail: xxc7902@163.com

quantity of coal has increased dramatically by ultrasonic incentive ; the modifier formula of ultrasound promoting methane desorption quantity changing with time in the coal is established. The fitting correction formula show that : gas desorption quantity α and α_1 increased with increasing pore pressure after saturated adsorption ; the methane saturated adsorption desorption quantity α_1 is greater than the desorption quantity α without ultrasonic incentive in same pore pressure ; the reason is that in the influence of power ultrasonic field strength , coal point of kinetic energy and potential energy increase , the coal surface even matrix internal adsorption of methane easier to stripping into determination of free , so as to achieve coal seam methane promoting desorption effect.

Key words : gas field development and exploitation ; ultrasonic incentive ; scale effect ; CT ; promoting methane desorption

1 引言

我国煤层气储层多属于低渗透储层, 储层岩性致密, 孔隙和吼道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系十分复杂, 存在着基质孔喉尺度和天然裂缝尺度重叠、多样甚至跨尺度效应, 致使储层中的煤层气吸附、解吸和渗流规律复杂, 运移规律不可预测, 工业化开采难以实现。煤层气产出是一个复杂的吸附/解吸、扩散/渗流过程, 对这一过程的储层物理性质和地质环境给予人为干扰和积极导向, 便构成了煤储层物理激励增采技术的主要内容, 现有的激励增采措施包括造穴、水力压裂、注气、竞争吸附等^[1]。但现有的增采技术存在地质环境制约性, 成本高等缺陷, 在现场应用方面具有一定的储层局限性, 而功率超声激励煤层气促解技术具有无地域性, 并可结合其他增采技术进行综合增采的优点。早在 20 世纪 50, 60 年代, 美苏就开始了超声波处理油层的研究工作, 研究资料表明, 其处理油层有良好的效果, 可以提高原油产量 40% ~ 50%, 提高采收率 10% 以上, 成功率可达 80%。

20 世纪 90 年代, 鲜学福教授提出了利用可控功率超声波通过物理激励的办法来提高煤层气抽采率的思想, 此后数年内, 为了探讨超声波对低渗甲烷储层的促解机制研究, 国内众多学者开展了深入的研究: 姜永东等^[1]采用实验研究方法, 研究了不加声场和加声场条件下煤中甲烷的解吸特性; 王松^[2]对含瓦斯煤体振动增透技术进行了实验研究, 模拟了煤岩样品的压实、煤层瓦斯气运移、煤与瓦斯突出以及不同振动条件下的煤的渗透性变化、微观结构变化, 并探讨不同频率、振幅、振动时间等条件下瓦斯的解吸特征; 姜永东等^[3]研究了在超声波作用下煤中甲烷气的解吸特性和超声波的热效应。前人的研究成果较好地证实了超声波可以实现储层甲烷气的增透和促解效果, 但由于我国煤甲烷

储层煤岩基质存在着多尺度效应, 且煤中甲烷气的赋存情况有别于石油。因此功率超声促解甲烷气机制尚不明确, 现有研究成果表明, 功率超声激励煤中甲烷气的运移控制模型研究较少, 功率超声物理参数对煤体质点振动及甲烷气促解的深入研究较少, 因此, 本文采用 CT 微观实验研究方法对超声波机械效应作用下的低渗煤样不同尺度裂隙发生、发育和发展规律进行研究, 以期从微观尺度探寻超声波促解机制, 通过对比功率超声激励低渗煤样吸附解吸实验结果, 建立功率超声激励低渗煤层甲烷促解修正公式, 揭示致密储层多尺度效应影响下超声波激励煤层甲烷气促解机制, 为建立功率超声物理激励低渗储层煤层气运移理论, 形成适合现场应用的低渗储层煤层气工业开发功率超声物理激励技术提供理论依据和技术指导。

2 功率超声激励低渗煤样裂隙演化显微 CT 实验

2.1 显微 CT 实验设备及试样

由于煤的多样性和不均匀性, 以及各种研究方法的局限性, 研究功率超声激励煤岩裂隙发展规律较困难, 已有的微观观测方法包括 SEM, NMRI 和 CT 扫描等。潘一山等^[4]利用 NMRI 技术成功实现了煤层中水气运移过程的实验研究; 在 CT 扫描微观实验方面, 国外, E. M. Withjack^[5]最早在 20 世纪 80 年代后期将计算机 CT 扫描技术应用于地质材料特性研究; 随后, T. Bernard 等^[6-10]也把 CT 扫描技术应用到地学的其他领域, 在 CT 测试技术、动态观测和实验方法等方面取得了重大进展。国内件彦卿等^[11-12]对单轴应力状态下的砂岩应变过程进行了 CT 观测, 将岩石应变过程分为 5 个阶段, 并在 CT 观测的基础上首次提出了基于 CT 数的密度损伤增量概念, 从而可以利用 CT 技术观测到岩石损伤的全过程。杨更社等^[13-14]进行了多种岩土材料的细观

破裂损伤 CT 观测和机制研究；任建喜等^[15]在 CT 观测技术的基础上设计了一套实时加载设备，实现了 CT 的动态观测，并且初步建立了基于 X 射线 CT 技术的岩石应力-应变本构关系。以上国内外研究对于把 CT 技术应用到岩石性质研究领域做了非常重要的贡献。

为了从微观尺度探寻功率超声促解机制，本文利用太原理工大学采矿工艺研究所的 μ CT225 kVFCB 型高精度显微 CT 系统进行了功率超声激励低渗煤样裂隙演化的 CT 实验。该系统主要由微焦点 X 光机、数字平板探测器、高精度的工作转台及夹具、机座、水平移动机构、采集分析系统等结构部分组成，CT 实验系统如图 1 所示；其最小焦点为 3 μ m，焦距 4.5 mm，放大倍数为 1~400 倍，密度分辨率 0.2%，可分辨 0.5 μ m 的孔隙。煤岩试样采用选取吉林华兴煤矿低渗煤样作为实验样本。



图 1 μ CT225kVFCB 型显微 CT 实验系统

Fig.1 Micro-CT experimental system μ CT225kVFCB

2.2 功率超声激励煤试样不同尺度裂隙的变化规律

实验时，先对低渗实验试样进行切割，切割后的煤试样尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm，从切割得到的煤试样中选取 2 块，利用 28 K 超声波发射器在低档功率和高档功率 2 个档位作用 30 min 后，用研磨的办法磨制成直径为 5 mm 的圆柱形试样，另外没有经过超声作用的煤样同样磨制成 5 mm 的试样(圆形试样是从 50 mm×50 mm×50 mm 中取出研磨而成的)，实验方案如表 1 所示。

表 1 煤样参数和 CT 微观实验方案

Table 1 Parameters of coal samples and micro-CT test scheme

煤样编号	煤样直径/mm	超声作用	CT 放大倍数
1 [#]	5	无	120
2 [#]	5	低档功率	120
3 [#]	5	高档功率	120

实验时，先将试样放置于显微 CT 扫描的转台上进行微观扫描，CT 扫描实验条件为：电流 75 μ A，

电压 60 kV，投影幅数 400，叠加帧频 1 fps，纵向切割 2000 层。从微观实验结果中选取 200，400，600，800，1 000，1 200，1 400，1 600 层 X-Y 剖面进行分析，煤样 CT 扫描裂隙扩展结果如图 2 所示。

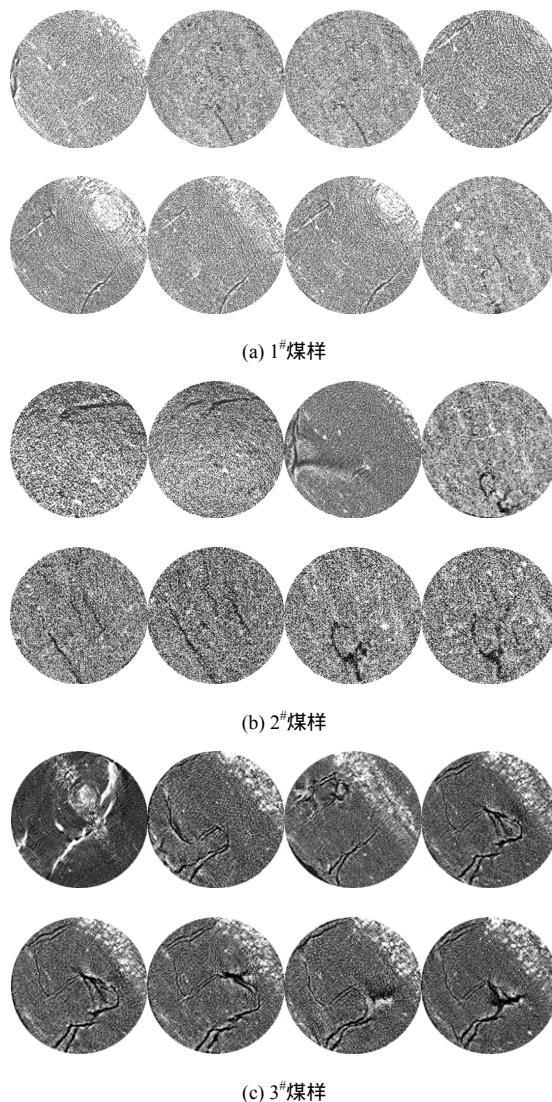


图 2 煤样 CT 扫描裂隙扩展结果

Fig.2 CT scanning results of coal samples

2.3 显微 CT 实验结果分析

利用 CT 扫描所得对应剖面的颜色变化可以反映功率超声激励煤样后，煤样不同尺度裂隙的变化规律，在 CT 扫描图上，白色代表密度大的硬质颗粒，黑色表示孔隙裂隙，从实验结果可以看出，无超声波激励作用时，煤样裂隙条数较少，由图 2 观察发现为 1~2 条；裂隙长度较短，单条裂隙最长约 2.5 mm；根据放大倍数，单条裂隙宽度为 0.67~0.98 μ m，且裂隙间隔较大，贯通裂隙很少，裂隙多位于所在剖面的边缘处，在该剖面上不能形成连续贯通裂隙通道。从图 2(b)，(c)观察发现，对应剖面内的

裂隙由剖面边缘逐渐向剖面内部扩展；裂隙数目逐渐增多，裂隙数目多为 5~10 条；单条裂隙长度较长，根据放大倍数单条裂隙宽度明显增加，单条裂隙宽度为 0.98~3.57 μm；且裂纹较密集的分布在试样剖面内，有逐步贯通趋势。特别是图 2(c)中第 1 400 和 1 600 层剖面，裂纹分别从试件左侧底部和顶部逐渐向中部贯通，形成了贯通主破裂裂纹，且在主裂纹周围有明显的微裂纹出现，形成了新的裂隙网络结构，具备了良好的贯通特性，从而为功率超声促解后甲烷气的运移提供通道。

3 功率超声激励低渗储层甲烷气促解特性实验研究

3.1 功率超声作用前后甲烷气解吸实验

(1) 实验装置及煤试样制备

实验装置由自制的三轴渗透仪、ZJS-500N 超声波发生器、甲烷气体供给系统、精密数字压力表、手动液压泵、稳压器等 6 个部分组成。ZJS-500N 超声波智能可控功率超声的实验系统可以调节声波频率和振幅，该系统由接收机、发射机、智能控制系统 3 个部分组成；三轴渗透仪是一个可以承受高压力的密封容器，可以进行高低压煤层气的吸附、解吸、渗流实验；围压系统采用手动的液压泵进行加载并利用稳压装置来维持实验围压；利用减压阀和高压甲烷气瓶来提供实验所需的甲烷进口压力，实验装置如图 3 所示。

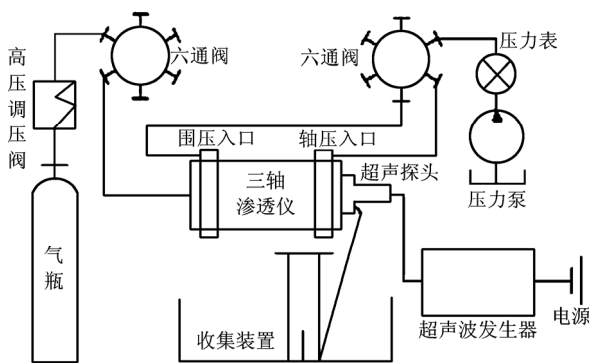


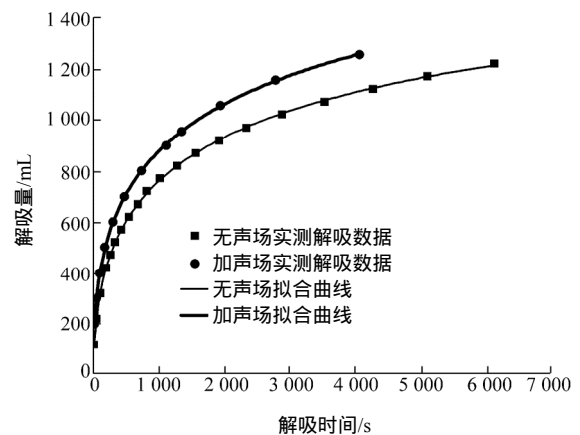
图 3 实验装置图

Fig.3 Experimental device

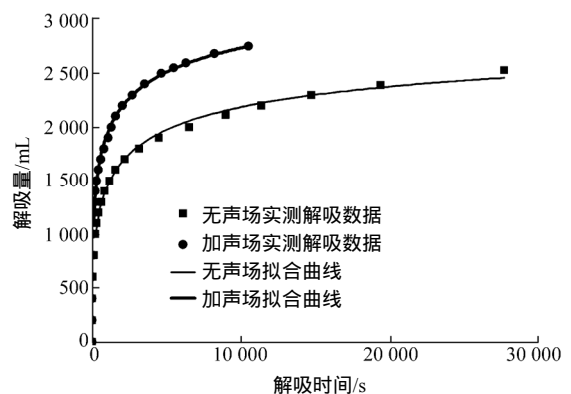
仍选取吉林华兴煤矿低渗煤样作为实验样本，将取回的煤岩按照国际岩石力学学会(ISRM)推荐标准切割加工成标准煤样，煤样尺寸为：50 mm×50 mm×100 mm。

(2) 功率超声激励甲烷气促解特性研究

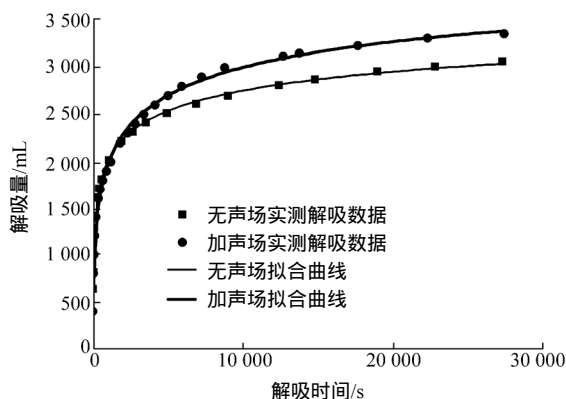
为了研究功率超声对低渗煤样内甲烷气的促解规律，实验时进行如下操作，首先，进行低渗煤样甲烷气吸附、解吸实验，研究不同甲烷进口压力下，低渗煤样解吸甲烷气的规律，在一次解吸实验结束后，采用真空泵脱气 4 h，重新给定相同的甲烷进口压力进行吸附，保证吸附时间和上次相同压力条件下的吸附时间相同，解吸前，先打开超声发射器，再进行解吸量测定，通过所得实验数据对比分析功率超声对低渗煤样中甲烷气解吸规律的影响，实验设定围压为 8 MPa，甲烷气孔隙压力为 0.8, 1.4 和 1.6 MPa，图 4 给出了不同孔隙压力下煤中甲烷气解吸量实测结果。由图 4 可知，在不同孔隙压力条件下，功率超声作用后，煤中甲烷气解吸总量均高于无超声作用时甲烷气的解吸总量，表明在超声波机械效应和热效应下，煤基质表面甚至内部的吸附甲烷气被脱附为游离态，从而增大了解吸量，甲烷气解吸趋于平衡总耗时间缩短，表明功率超声作用后，甲烷解吸速率加快；随着孔隙压力的增加，无论有无超声作用，煤中甲烷气的总解吸量增加，在较高孔隙压力下，功率超声的促解效果更加显著，以孔隙压力为 1.4 MPa 为例，无超声作用时，煤中甲烷气总解吸量约为 2 250 mL，超声作用后可达到



(a) 孔隙压力 0.8 MPa



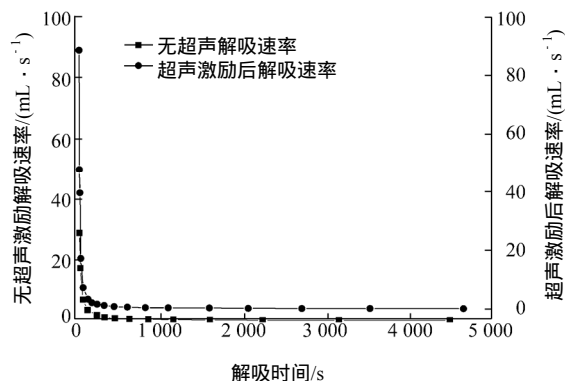
(b) 孔隙压力 1.4 MPa



(c) 孔隙压力 1.6 MPa

图 4 不同孔隙压力下煤中甲烷气解吸量实测结果

Fig.4 Actual measurement desorption results of methane in coal under different pore pressures



(c) 孔隙压力 1.6 MPa

图 5 不同孔隙压力下煤中甲烷气解吸速率

Fig.5 Desorption velocity results of methane in coal under different pore pressures

2 800 mL 左右，比无声场作用时解吸总量提高了 24.4%，且甲烷气解吸趋于平衡总耗时间显著缩短，由此可见，功率超声的促解效果明显。

图 5 给出了不同孔隙压力下煤中甲烷气解吸速率。从图 5 可以发现，功率超声对煤中甲烷气解吸速率影响显著，在相同孔隙压力条件下，有功率超声作用时，甲烷气解吸速率均高于无超声时的解吸速率，且甲烷气解吸速率趋于稳定的时间提前；孔隙压力增大后，功率超声作用的甲烷气的解吸速率显著加快，以孔隙压力为 1.6 MPa 为例，功率超声

作用时，煤中甲烷气的初始解吸速率约可以达到 90 mL/s，而无超声作用时，甲烷气初始解吸速率仅为约 30 mL/s，可见功率超声对煤中甲烷气解吸具有显著的促解作用。

3.2 功率超声激励低渗储层甲烷气解吸修正公式

结合节 3.1 中所得的实验数据进行分析发现，无论有无超声作用，煤中甲烷气解吸量与时间关系曲线与 Langmuir 曲线相似，无超声作用时，煤中甲烷气随时间变化的拟合关系式为

$$Q_{(t)} = \frac{\alpha\beta t^{1-c}}{1 + \beta t^{1-c}} \quad (1)$$

式中： $Q_{(t)}$ 为总解吸量(mL)， α 为饱和吸附时解吸量(mL)， β 为吸附/解吸参数(s^{-1})， c 为拟合参数， t 为解吸时间(s)。

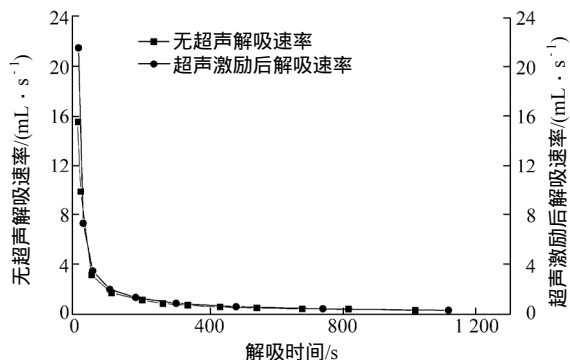
无超声作用时，对比孔隙压力为 0.8，1.4 和 1.6 MPa 时的实验拟合结果可以看出，煤中甲烷气孔隙压越大，饱和吸附时的解吸量 α 越大，不加声场甲烷解吸动力学参数如表 2 所示。

表 2 不加声场甲烷解吸动力学参数

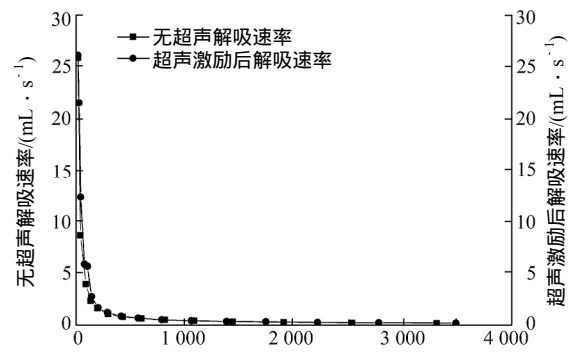
Table 2 Dynamical parameters of methane desorption without sound field

孔隙压力/MPa	α /mL	β / s^{-1}	c	相关系数
0.8	1 988.928 39	0.018 12	0.488 78	0.999 86
1.4	3 221.523 52	0.045 71	0.583 89	0.996 41
1.6	4 184.580 27	0.100 06	0.678 85	0.996 31

在功率超声作用下，当超声波传播到煤介质中某处时，该处静止的质点开始振动，具有动能。同时该处的介质会发生变形，具有了位能，煤介质的



(a) 孔隙压力 0.8 MPa



(b) 孔隙压力 1.4 MPa

孔隙裂隙分布受超声波影响发生显著变化，导致煤基质表面甚至内部吸附的甲烷气获得足够动能发生脱附现象，由于基质变形的位能效应，煤中甲烷气运移通道增多，在宏观上表现为解吸量增大，解吸速度加快。由于超声声强参数是使得煤介质获得动能和位能的主要因素，因此实验时可以通过超声波发生器具有的 3 个不同功率档位来计算声强参数。先利用不同档位负载时的工作电流和电压值可以计算出在实验负载时的功率，经过对超声发射探头面积的测算，可得探头面积，利用下式即可算出不同功率档位下的功率超声初始声强 J_0 ：

$$J_0 = \frac{UIt}{S_t} = \frac{UI}{S} \quad (2)$$

式中： U 为工作电压(V)， I 为超声波发生器工作时的电流(A)， S 为探头面积(cm^2)。

通过对探头面积进行测算，和不同档位负载工作时工作电流和电压的测定，可得如表 3 所示的超声声强相关参数，在本次实验中采用高档位时的超声波对煤中甲烷气解吸进行激励。

表 3 声强相关参数

Table 3 Parameters of sound intensity function

档位	电流/A	电压/V	探头面积/ cm^2	初始声强 $J_0/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$
低	0.75	110	1.99	3.05
中	1.05	110	1.99	4.27
高	1.10	110	1.99	4.48

高档位时，初始声强 $J_0 = 4.48 \text{ W/cm}^2$ ，通过对超声作用时煤中甲烷气解吸量实测数据分析拟合后知，其拟合参数变化如表 4 所示。

表 4 超声激励时解吸动力学参数

Table 4 Dynamical parameters of methane desorption with sound field

孔隙压力/MPa	α_1/mL	β/s^{-1}	c	相关系数	$A/(\text{mL} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{W}^{-1})$
0.8	2 423.65	0.024	0.54	0.999 9	540.99
1.4	3 838.77	0.069	0.61	0.995 9	856.87
1.6	4 547.28	0.047	0.60	0.995 6	1 015.02

由于实验煤样尺寸较小，超声声强的衰减系数影响忽略不计，如果假设煤中饱和吸附甲烷气时的解吸量 α 与初始声强满足线性比例关系，可以引入拟合参数 α_1 和比例系数 A ，其中， $\alpha_1 = AJ_0$ 。超声声强参数影响的煤中甲烷气解吸量随解吸时间变化

的实验修正公式如下：

$$Q_{(t)} = \frac{AJ_0\beta t^{1-c}}{1 + \beta t^{1-c}} \quad (3)$$

对比表 1 和 3 发现，煤中甲烷气饱和吸附后的解吸量即 α 和 α_1 均随孔隙压力的增大而增大，而且相同孔隙压力下的 α_1 要大于 α ，其原因在于受到功率超声的初始声强影响，增加了煤质点的动能，使得煤表面和内部吸附的甲烷更容易脱附变成游离态，且由于煤基质在功率超声作用下具有更大的位能，使得脱附的甲烷气具有了更多的渗流通道，从而达到了功率超声的促解效果。

4 结 论

本文利用 CT 观测和超声促解实验对功率超声作用前后低渗透煤中甲烷气的解吸规律进行分析，得到如下结论：

(1) 无功率超声作用时，煤样裂隙条数较少，且裂隙间隔较大，贯通裂隙少，裂隙多位于所在剖面的边缘处，在该剖面上不能形成连续贯通裂隙通道。功率超声作用后，煤体对应剖面内的裂隙由剖面边缘逐渐向剖面内部扩展；裂隙数目增多，单条裂隙长度较长，且裂纹较密集地分布在试样剖面内，有逐步贯通趋势，并且形成了新的裂隙网络结构，具备了良好的贯通特性，从而为功率超声促解后甲烷气的运移提供通道。

(2) 在不同孔隙压力条件下，功率超声作用后的实验结果表现为：煤中甲烷气的总解吸时间显著缩短，总解吸量增大。实测解吸数据符合 Langmuir 关系。在相同孔隙压力条件下，功率超声作用时，甲烷气解吸速率高于无超声作用时甲烷气的解吸速率，甲烷气解吸速率趋于稳定的时间提前；孔隙压力增大后，功率超声作用的甲烷气解吸速率显著提高。

(3) 分析功率超声促解的解吸量和解吸时间拟合修正公式中拟合参数发现，煤中甲烷气饱和和吸附后的解吸量即 α 和 α_1 均随孔隙压力的增加而增大，相同孔隙压力下的甲烷气饱和和吸附解吸量 α_1 大于无超声作用时的解吸量 α ，其原因在于受到功率超声的初始声强影响，增加了煤质点的动能和位能，使得煤表面甚至基质内部吸附的甲烷更容易脱附变成游离态，达到了功率超声激励煤层甲烷气的促解效果。

(4) 本文在宏观实验结果对比的基础上，建

立了超声激励低渗储层甲烷气解吸修正公式，和姜永东等^[1, 3]的研究结果相比，明确提出了功率超声促解的关键参数即超声初始声强，分析所得实验数据，建立了超声声强促进甲烷气解吸的修正公式，为建立功率超声促进甲烷气解吸理论模型和分析促解机制提供实验基础。

由于国内 CT 设备现状，现有的实验装备无法实现同一块煤样超声作用前后的 CT 观测和解吸量测量，从而使得本文的结果具有相对的参考意义，深入研究有待于以后实验技术的提高。

参考文献(References)：

- [1] 姜永东,熊 令,阳兴洋,等. 声场促进煤中甲烷解吸的机制研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10) : 1 649–1 653.(JIANG Yongdong , XIONG Ling , YANG Xingyang , et al. Mechanism research on sound field promoting the coal bed methane desorption[J]. Journal of China Coal Society , 2010 , 35(10) : 1 649–1 653.(in Chinese))
- [2] 王 松. 含瓦斯煤体振动增透技术试验研究[硕士学位论文][D]. 合肥:安徽理工大学, 2010.(WANG Song. Experimental research on the technology of vibrating increases permeability in gas-containing coal[M. S. Thesis][D]. Hefei : Anhui University of Science and Technology , 2010.(in Chinese))
- [3] 姜永东,鲜学福,易 俊,等. 声震法促进煤中甲烷气解吸规律的实验及机制[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6) : 675–680.(JIANG Yongdong ,XIAN Xuefu ,YI Jun ,et al. Experiment and mechanism on the features of ultrasonic vibration stimulating the desorption of methane in coal[J]. Journal of China Coal Society ,2008 ,33(6) :675–680. (in Chinese))
- [4] 潘一山,唐巨鹏,李成全. 煤层中气水两相运移的 NMR 试验研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5) : 1 620–1 626.(PAN Yishan , TANG Jupeng , LI Chengquan. NMR test on two phase transport of gas water in coal seam[J]. Chinese Journal Geophysics , 2008 , 51(5) : 1 620–1 626.(in Chinese))
- [5] WITHJACK E M. Computed tomography for rock property determination and fluid-flow visualization[R]. SPE 16951 , 1988.
- [6] BERNARD T , GEORGE S , KEN F. Imaging of sand production in a horizontal sand pack by X-ray computed tomography[R]. SPE 30248 , 1996.
- [7] KAWAKATA H , CHO A , YANAGIDANI T , et al. The observations of faulting in Westerly granite under triaxial compression by X-ray CT scan[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 1997 , 34(3/4) : 151–162.
- [8] GOODWIN A K , O'NELL M A , ANDERSON W F. The use of X-ray computer tomography to investigate particulate interactions within opencast coal mine backfills[J]. Engineering Geology , 2003 , 70(2) : 331–341.
- [9] SUN W , SHI C G , ZHAO J Z. Application of X-CT scanned image technique in the research of micro-pore texture and percolation mechanism in ultra-permeable oil field[J]. Acta Geologica Sinica , 2006 , 80(5) : 775–778.
- [10] NGUYEN Q P , ROSSEN W R , ZITHA P L J , et al. Determination of gas trapping with foam using X-flay computed tomography and effluent analysis[R]. SPE94764 , 2008.
- [11] 仵彦卿,丁卫华. 单轴条件下砂岩三维破裂过程的 CT 观测[J]. 工程地质学报, 2002, 10(1) : 93–97.(WU Yanqing , DING Weihua. X-ray CT observation on three-dimensional fracturing process of sandstone specimen under uniaxial condition[J]. Journal of Engineering Geology , 2002 , 10(1) : 93–97.(in Chinese))
- [12] 丁卫华,仵彦卿,蒲毅彬,等. CT 技术应用于岩石实验动态观测的新进展[J]. 冰川冻土, 2000, 9(3) : 218–222.(DING Weihua , WU Yanqing , PU Yibin , et al. New progress in real-time detection of geotechnical experiment by use of X-ray computed tomography[J]. Journal of Glaciology and Geocrgolody , 2000 , 9(3) : 218–222.(in Chinese))
- [13] 杨更社. 岩石细观损伤力学特性及本构关系的 CT 识别[J]. 煤炭学报, 2000, 25(12) : 102–106.(YANG Gengshe. CT identification on the meso-damage mechanic characteristics and constitutive relation of rock[J]. Journal of China Coal Society , 2000 , 25(12) : 102–106.(in Chinese))
- [14] 杨更社,路忠盛,蒲毅彬. 三轴受力状态下岩石损伤扩展力学特性研究[J]. 西安科技学院学报, 2000, 20(6) : 101–104.(YANG Gengshe , LU Zhongsheng , PU Yibin. On the mechanic characteristics of damage propagation of rock under triaxial stress condition[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology , 2000 , 20(6) : 101–104.(in Chinese))
- [15] 任建喜,葛修润,蒲毅彬. 岩石破坏全过程的 CT 细观损伤演化机制动态分析[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(4) : 12–15.(REN Jianxi , GE Xiurun , PU Yibin. CT real-time analysis of meso-damage propagation law of the whole process of rock failure[J]. Journal of Xi'an Highway University , 2000 , 20(4) : 12–15.(in Chinese))