

中文引用格式:李贺,蒋训祁,鲁义,等. 循环微波辐射下含水煤体的孔隙结构演化机制[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11):99-107.

英文引用格式:LI He, JIANG Xunqi, LU Yi, et al. Evolution mechanism of pore structure of water-bearing coal under cyclic microwave radiation[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11):99-107.

循环微波辐射下含水煤体的孔隙结构演化机制*

李贺教授, 蒋训祁, 鲁义教授, 施式亮教授, 路洁心, 曹洁艳

(湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南湘潭 411201)

中图分类号: X936 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.11.0347

基金项目: 国家自然科学基金资助(52274195); 湖南省科技创新计划项目(2022RC1178)。

【摘要】 为更好利用微波增透技术安全高效地抽采煤层瓦斯, 探究循环微波条件下煤体含水量变化对增透效果的影响, 首先, 通过核磁共振(NMR)技术获得表征煤样孔隙结构特征的横向弛豫时间(T_2)谱和纵向弛豫时间(T_1)- T_2 谱; 然后, 利用 T_2 数据得到核磁特征参数, 进一步明确循环微波辐射下煤体孔隙结构演化随含水量变化的情况; 最后, 基于循环微波增透机制, 揭示不同含水煤体的孔隙结构演化机制。结果表明: 循环微波辐射下, 不同含水饱和度煤体的孔隙结构均得到明显改善, 其中75%含水饱和度煤样具有比其他试验煤样更佳的增透效果。循环微波辐射促使孔隙向更大孔径演化过程中, 煤体由于发生热破裂而出现孔隙堵塞现象, 提高含水饱和度可以减少此现象出现; 循环微波增透主要依靠热应力和气压驱动, 随着煤体透气性的改善, 微波增透效果有所减弱, 煤体含水量的影响随之减弱。

【关键词】 煤层瓦斯; 循环微波辐射; 含水煤体; 孔隙结构; 核磁共振(NMR)

Evolution mechanism of pore structure of water-bearing coal under cyclic microwave radiation

LI He, JIANG Xunqi, LU Yi, SHI Shiliang, LU Jiexin, CAO Jieyan

(School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: In order to better use microwave antireflection technology to safely and efficiently extract coal seam gas, and to explore the influence of coal moisture content change on the antireflection effect under cyclic microwave conditions, firstly, the transverse relaxation time (T_2) spectrum and longitudinal relaxation time (T_1)- T_2 spectrum characterizing the pore structure characteristics of coal samples were obtained by NMR technology. Then, the characteristic parameters of nuclear magnetic resonance were obtained by using T_2 data, and the change of pore structure evolution with water content under cyclic microwave radiation was further clarified. Finally, based on the mechanism of cyclic microwave permeability enhancement, the pore structure evolution mechanism of different water-bearing coal bodies was revealed. The results show that the pore structure of coal with different water saturation is obviously improved under cyclic microwave radiation, and the coal sample with 75% water saturation has a better

antireflection effect than other test coal samples. In the process of cyclic microwave radiation promoting the evolution of pores to larger pores, pore blockage occurs due to the thermal fracture of coal, and increasing water saturation can reduce this phenomenon. The cyclic microwave anti-reflection mainly relies on thermal stress and air pressure. With the improvement of coal permeability, the effect of microwave anti-reflection is weakened, and the influence of coal water content is weakened.

Keywords: coal seam gas; cyclic microwave radiation; water-contained coal; pore structure; nuclear magnetic resonance(NMR)

0 引言

基于我国“富煤、贫油、少气”的国情,高效抽采煤层瓦斯,既能发挥煤矿资源在能源安全方面的兜底作用,又能保障煤矿安全^[1-2]。但是,由于大量瓦斯被吸附在煤的微孔中,加之开采深度的增加,煤层瓦斯“高储低渗”特征愈加明显,使得瓦斯高效抽采利用受到严重制约^[3]。

在新兴的煤层增透技术中,微波辐射增透技术因其热效率高、选择性加热、对环境友好等优点,受到不少学者的关注^[4-8],其中,曹轩^[6]研究了不同含水率煤样在微波辐射后的孔隙结构,发现提高含水率可以显著提升微波辐射致裂煤体的效果;LI He等^[7]采用核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)等表征手段,开展煤层的微波增透技术研究,并指出微波辐射可促使孔裂隙在蒸气压作用下发生热膨胀,从而提高煤层的透气性;胡国忠等^[8]基于NMR的定量表征方法,探究了微波辐射前后不同含水饱和度煤体的孔渗特性,认为水分蒸发形成的蒸气压对煤体孔隙的作用效果有限。

上述研究表明:煤体中的水分对微波增透效果的影响不可忽视,微波辐射能够使煤体快速升温,促进孔隙发育和瓦斯解吸。例如:马学舟等^[9]采用力学试验等方法,探究了微波辐射对煤体的损伤弱化作用,提出了微波辐射可以促进煤体孔隙发育,并降低其冲击破坏的危险性;朱健等^[10]利用自研装置进行不同层理方向的煤层微波增透试验,发现煤层层理对微波辐射增透效果的影响显著;林柏泉等^[11]设计了煤的循环微波辐射试验,并据此研究微波辐射下煤体孔裂隙结构的演化特征,结果表明:微波辐射可促进煤体孔隙结构扩展;杨新乐等^[12]利用数值模拟手段探究脉动微波循环加热对煤层气开采的影响,得出脉动微波循环加热能促进煤层瓦斯大量解吸的结论;HUANG Jinxin等^[13]总结煤层微波增透技术的研究进展,详细讨论了煤阶、含水量和矿物成分等煤层特性对微波增透效果的影响,发现已有研

究在哪种煤阶具有更高介电常数、提高含水量是否提高增透效果等方面仍存在争议。

然而,上述研究工作很多只关注连续微波辐射下的煤层增透效果;部分学者指出长时间连续微波辐射可能会对煤层瓦斯抽采造成的损害,如张连昆^[14]指出,长时间的微波连续辐射会使煤原位热解,并且热解后的产物——焦油易使孔隙堵塞;董超等^[15]的研究表明:过长时间的微波辐射会导致煤孔隙结构出现明显塌缩。相较于长时间连续微波辐射,循环微波辐射可以在保证微波增透效果的同时,克服微波快速加热带来的负面影响,但目前关于煤层的循环微波增透研究较少。

鉴于此,笔者拟在循环微波条件下,利用低场NMR探究不同含水煤体的孔隙结构演化机制,以期理清含水量对循环微波增透效果的影响机制提供依据。

1 循环微波辐射含水煤体试验

1.1 煤样制备

文中煤样取自安徽省祁南煤矿,根据NMR检测要求,将煤样制成直径25 mm、高50 mm的圆柱试件,其工业分析结果见表1。循环微波辐射试验共使用20个煤样,分为4组,其中1组用于预试验,另外3组用于重复试验。

表1 煤样的工业分析结果

Table 1 Industrial analysis results of coal samples %			
水分	挥发分	灰分	固定碳
3.18	28.16	5.36	63.30

1.2 试验装置与步骤

使用微波管式炉,微波输出功率10~1400 W,且连续可调,微波频率为2.45 GHz。由于循环微波辐射的作用,使得煤样的最大含水率在微波处理后有所变化。因此,为保证试验煤样的含水量在循环微波处理中始终保持同一条件,用含水饱和度梯度代替含水率梯度,并设置0%、25%、50%、75%、100%共5个梯度

代表煤体的不同水分吸收程度,以揭示循环微波辐射下不同含水煤体的孔隙结构演化特性。

煤样的 NMR 检测过程依照国家标准《煤和岩石孔径分布的测定 核磁共振法》^[16] 进行,主要试验方案及流程如下:

1) 对原煤进行核磁检测。将目标含水饱和度为 0%、25%、50%、75%、100% 的煤样分别标记为 M_0 、 M_{25} 、 M_{50} 、 M_{75} 、 M_{100} 。在不影响检测结果的前提下,利用干燥箱将煤样在 50 °C 下恒温干燥 24 h,得到完全干燥时的重量。利用真空饱和加压装置对煤样进行 1 MPa、24 h 充分饱水处理,之后进行 NMR 检测。

2) 得到不同含水饱和度煤样。在与步骤 1) 相同的饱水处理条件下,保证煤样达到 100% 饱水状态。将试验煤样在 50 °C 恒温条件下干燥不同时间,使其含水饱和度达到目标状态。干燥过程中,每隔 15 min 称 1 次试验煤样质量,接近目标含水饱和度时每隔 5 min 称重 1 次,确保煤样的含水饱和度与目标值相差不超过 1%。

3) 对煤样进行微波处理。将煤样放入工业微波炉中,启动仪器,进行 8 min、1 400 W 额定功率微波辐射。由于工业微波炉的功率由 0 W 加载到 1 400 W 通常不超过 15 s,可以将微波辐射功率全程视为 1 400 W。由于试验条件下微波的场强和能域分布不均匀,为减少试验误差,所有煤样在同一位置接受微波辐射。

4) 对微波处理后的煤样进行 NMR 检测。对微波处理后的煤样进行与原煤相同的 NMR 检测。

重复步骤 2) — 4) 的操作,如此循环 3 次。

1.3 基于 NMR 的孔隙结构检测方法

在煤的孔隙结构表征方面,NMR 技术能够无损、快速、精准地实现煤的全尺度孔隙检测^[17]。文中采用低场 NMR 仪,通过检测煤样中的含¹H 流体在外加磁场下的弛豫时间,从而得到含¹H 流体所在孔隙的相关信息。试验煤样中的含¹H 流体为水。

在实验室条件下,煤体中含¹H 流体的横向弛豫时间(T_2 ,ms)与孔径的关系可以表示为:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V} = F_s \cdot \rho \times \frac{1}{r} \rightarrow T_2 \propto r \quad (1)$$

式中: ρ 为表面弛豫强度,通常视为固定值,取 10 $\mu\text{m/s}$; S/V 为孔隙的比表面积, m^2/m^3 ; F_s 为孔形状因子,柱状孔隙时其值取 2; r 为孔径, μm 。

由式(1)可知: T_2 与 r 成正比,即 T_2 值越大,所对应的孔隙 r 越大。因此,利用得到的 T_2 ,可以了解煤样中的孔径分布、孔隙连通性、孔喉区间分布等孔

隙结构特征^[18-19]。利用煤样饱水 T_2 谱和离心 T_2 谱得到 T_2 截止值, T_2 截止值变化在一定程度上可以反映出煤体中的孔隙闭合程度的变化。

T_2 谱对于流体特性的识别存在一定误差,而 T_2 与纵向弛豫时间(T_1)结合形成的 T_1-T_2 谱可以更准确地区分不同含¹H 流体和同一含¹H 流体的不同相态(结合水、束缚水和自由水等)。在文中的 T_1-T_2 谱中,不同区域信号表示的含¹H 流体类型如图 1 所示^[20]。

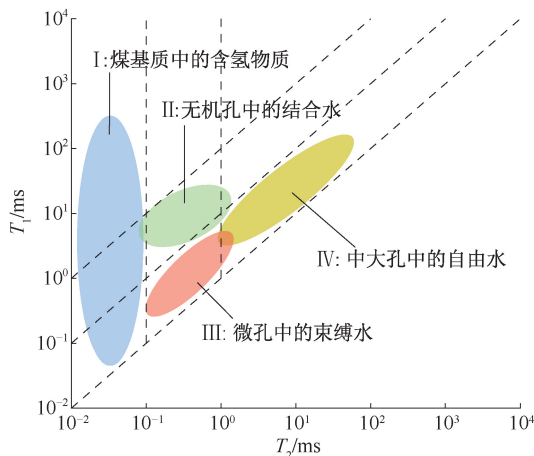


图 1 T_1-T_2 谱中不同含¹H 流体信号区域

Fig. 1 Different ¹H-containing fluid signal in T_1-T_2 spectrum

2 含水煤体孔隙结构演化机制

2.1 NMR 波谱分析

2.1.1 T_2 谱曲线分析

微波辐射前后煤样的 T_2 谱演化情况如图 2—图 6 所示。根据相关研究^[21-22],笔者将不同孔径孔隙与 T_2 谱曲线的对应关系分为 3 个区域,其中微孔对应 $T_2 < 2$ ms,中孔对应 $2 \text{ ms} \leq T_2 \leq 50$ ms, $T_2 > 50$ ms 则对应大孔。由图 2 可知:在原煤中,微孔和中孔的发育程度均较高。大孔发育则存在差异,其中, M_{25} 和 M_{50} 原煤的大孔发育较为明显,对应的 T_2 谱曲线形成了肩峰结构。

随着微波循环次数的增加,不论含水饱和度的高低,微孔、中孔和大孔区间的 T_2 峰值均呈增长趋势,其中微孔区间的 T_2 峰值在增加的同时其对应的孔径减小。微孔与中孔的融合度则随着微波循环次数的增加而降低。由此可知:循环微波主要促使介于微孔与中孔之间的孔隙通道更迭为孔径更大的孔隙结构,同时微孔侧由于热破裂发生孔隙拓展,使得

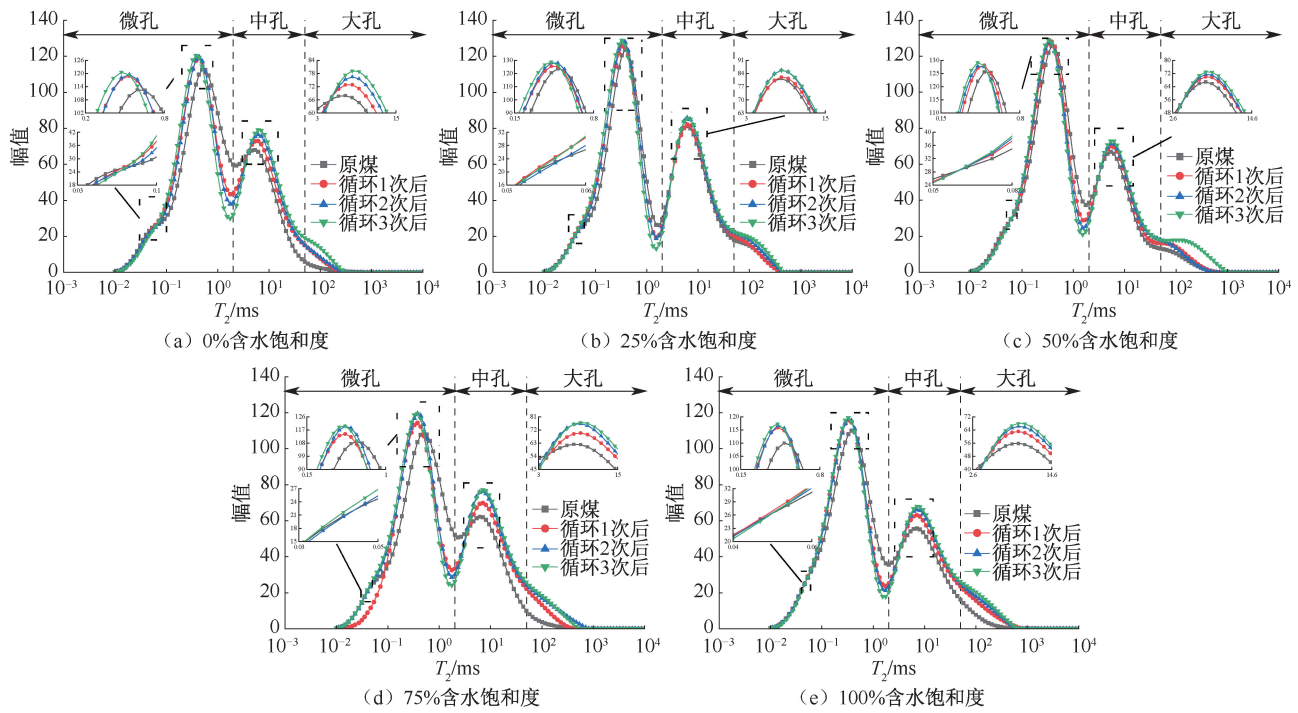


图2 不同含水饱和度煤样的 T_2 谱演化

Fig. 2 T_2 spectrum evolution of coal sample with different water saturation

微孔区间的 T_2 峰值不减反增但对应的孔径减小。

循环微波辐射后微孔峰、中孔峰及两峰间波谷的幅值变化情况如图3所示。循环微波辐射后, M_0-M_{100} 煤的微孔峰幅值增加 3.66~10.56, 中孔峰幅值增加 4.35~14.98, 两峰间波谷幅值降低

13.07~29.41。不论含水饱和度高低, 3种幅值的变化均呈“减—增—减”趋势, 说明较低含水饱和度反而会使循环微波辐射效果有所减弱, 过高的含水饱和度也不利于循环微波辐射的增透效果进一步提高。

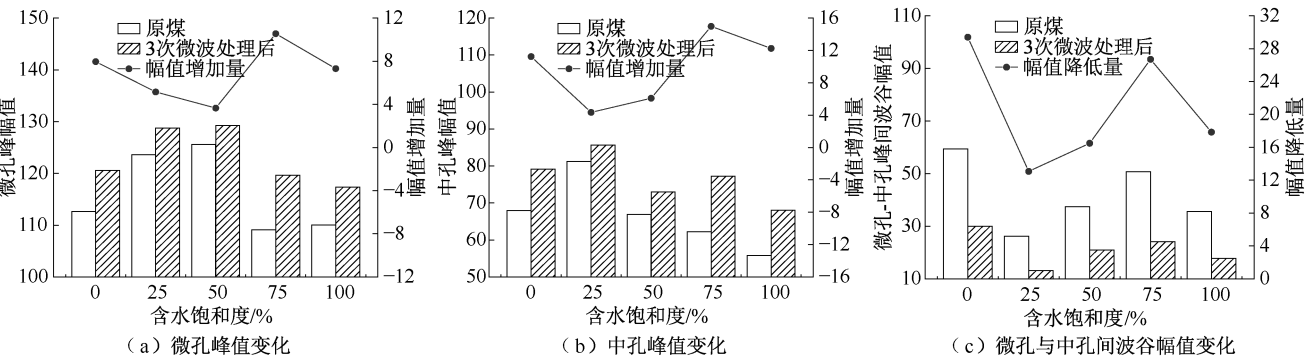


图3 微孔峰、中孔峰及两峰间波谷幅值变化

Fig. 3 Amplitude changes of micropore peak, mesopore peak and trough between two peaks

2.1.2 T_2 谱面积分析

T_2 谱面积变化可以反映煤中不同孔体积的演化特征。根据煤中不同孔隙的瓦斯吸附特点, 分别求取以微孔为代表的吸附孔和以中、大孔为代表的渗流孔的 T_2 谱面积, 二者相加得到总孔隙的 T_2 谱面积。计算得到的 T_2 谱面积见表2。

由表2可知: M_0-M_{100} 原煤的渗流孔占比为

32%~42%, 经过循环微波处理后, 渗流孔占比增长为 42%~44%。循环微波对煤体中的孔隙尤其是渗流孔起扩孔和开孔作用, 从而使渗流孔占比提高, 这对提高瓦斯抽采效率具有积极作用。在循环微波作用后, M_{75} 煤的 T_2 谱总面积增加了 12.56%, 增长幅度最大, 说明高含水饱和度可以促进微波增透效果。但是, M_{100} 煤的 T_2 谱总面积增长率为 8.88%, 略高

表 2 循环微波条件下不同含水饱和度煤样的 T_2 谱面积变化Table 2 Change of T_2 spectral area of coal samples with different water saturation under cyclic microwave conditions

孔隙类型	含水饱和度/%	T_2 谱面积				总增幅程度/%
		原煤	循环 1 次后	循环 2 次后	循环 3 次后	
吸附孔	0	2 025. 836	1 937. 267	1 884. 41	1 871. 838	-7. 60
	25	1 865. 448	1 887. 79	1 880. 006	1 880. 845	0. 83
	50	2 023. 991	1 959. 765	1 934. 842	1 915. 345	-5. 37
	75	2 005. 109	1 767. 157	1 917. 584	1 908. 728	-4. 81
	100	1 941. 281	1 902. 382	1 873. 722	1 854. 638	-4. 46
渗流孔	0	956. 843	1 199. 496	1 241. 696	1 332. 215	39. 23
	25	1 341. 829	1 396. 15	1 456. 57	1 501. 088	11. 87
	50	1 071. 94	1 193. 319	1 202. 64	1 363. 123	27. 16
	75	983. 021	1 287. 142	1 432. 735	1 454. 605	47. 97
	100	1 010. 553	1 235. 637	1 306. 645	1 359. 339	34. 51
总孔隙	0	2 982. 679	3 136. 763	3 126. 106	3 204. 053	7. 42
	25	3 207. 277	3 283. 94	3 336. 576	3 381. 933	5. 45
	50	3 095. 931	3 153. 084	3 137. 482	3 278. 468	5. 90
	75	2 988. 13	3 054. 299	3 350. 319	3 363. 333	12. 56
	100	2 951. 834	3 138. 019	3 180. 367	3 213. 977	8. 88

于 M_0 煤的 7.42%, 低于 M_{75} 煤。这表明含水饱和度越高, 并不意味着循环微波辐射对含水煤体的增透效果越好。

在第 2 次微波循环后, M_0 和 M_{50} 煤的总孔隙体积分别出现了 0.34% 和 0.49% 的轻微降幅, 说明循环微波对含水煤体中孔隙的作用机制较为复杂, 导致单轮微波处理效果具有波动性。

循环微波处理后, 除 M_{25} 煤外, 含水饱和度越低, 煤样的吸附孔体积总降幅越大。然而, 煤样的渗流孔体积总增幅并非随含水饱和度增加而一直增加, 最大增幅为 M_{75} 煤的 47.97%。由此可知: 在含水煤体孔隙演化更迭时, 含水饱和度越低, 存在的塌孔现象越明显。因此, 循环微波辐射下煤体水分的蒸发流动, 对孔隙的疏通、扩容具有重要意义。 M_{25} 煤的吸附孔体积在循环微波辐射后出现 0.83% 轻微增幅, 考虑到 M_{25} 原煤检测数据反映其较好的孔隙发育程度, 说明循环微波增透效果随着煤样渗透性的提高出现一定程度的减弱。

2.2 二维 T_1-T_2 谱分析

M_{75} 的 T_1-T_2 谱变化情况如图 4 所示。由于微孔在煤体孔隙结构中占据主导地位, 循环微波处理后束缚水信号变化幅度显著强于自由水。循环微波辐射下, M_{75} 煤的束缚水信号峰值由 27.7 先增至 105.5, 又减至 69.2, 之后又激增到 159.0, 呈现“增—减—增”趋势。这说明第 1 次微波处理后, 新生成的微孔中有相当部分未与其他孔隙贯通, 造成

束缚水信号更集中。当存在一定水分时, 在下 1 轮微波辐射过程中, 微孔内能够形成足够的蒸气压促进孔隙连通, 使束缚水信号区域有所恢复, 信号峰值有所回落。第 3 次微波处理后, 又有未贯通的微孔生成, 束缚水信号再次激增。

M_0 的 T_1-T_2 谱变化情况如图 5 所示。 M_0 煤的信号峰值在第 1 次微波处理后最高, 在之后 2 轮微波处理后有一定回落, 这表明当煤样干燥时, 生成的未贯通孔隙数量较多, 而煤基质热破裂促进孔隙贯通的效果有限。由此可见: 循环微波辐射下煤体水分蒸发形成的蒸气压有利于促进孔隙贯通, 为煤层瓦斯渗流提供更多通道。

2.3 核磁特征参数分析

2.3.1 孔喉分布

总孔喉分布的变化情况及其线性拟合结果如图 6 所示。由图 6 可知: 不同含水饱和度条件下, 煤样受微波辐射后孔喉均出现增长, 总孔喉分布由 22.86%~25.33% 增至 25.05%~26.51%。

M_{25} 、 M_{50} 煤线性拟合斜率小于 M_0 (0.54), 而 M_{75} 、 M_{100} 大于 M_0 。以含水饱和度 50% 为界, 高含水饱和度情况下水分吸收微波能为进一步提高增透效果提供驱动力, 低含水饱和度下煤体中的水分反而单纯消耗微波能量, 使增透效果有所降低。 M_{75} 和 M_{100} 煤线性拟合的斜率分别为 1.02 和 0.7, 说明过高的含水饱和度在消耗更多微波能的同时无法促进微波增透效果的进一步提升, 反而使这种促进效果有所回落。

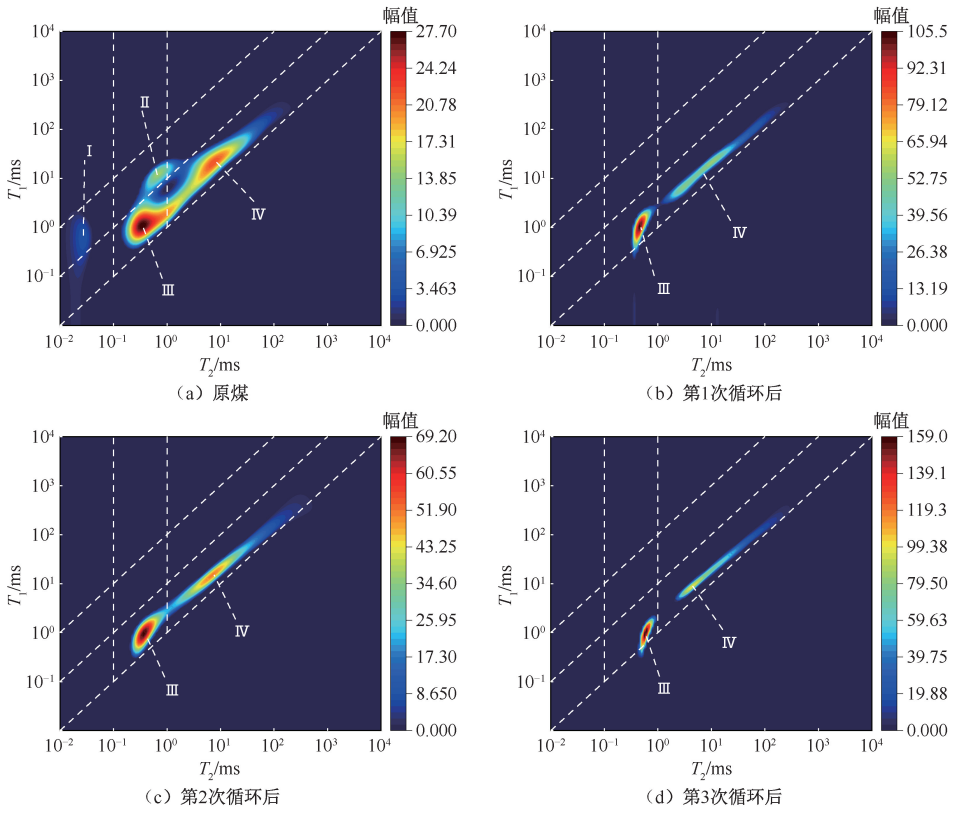


图4 M_{75} 煤的 T_1-T_2 谱

Fig. 4 T_1-T_2 spectrum of M_{75} coal

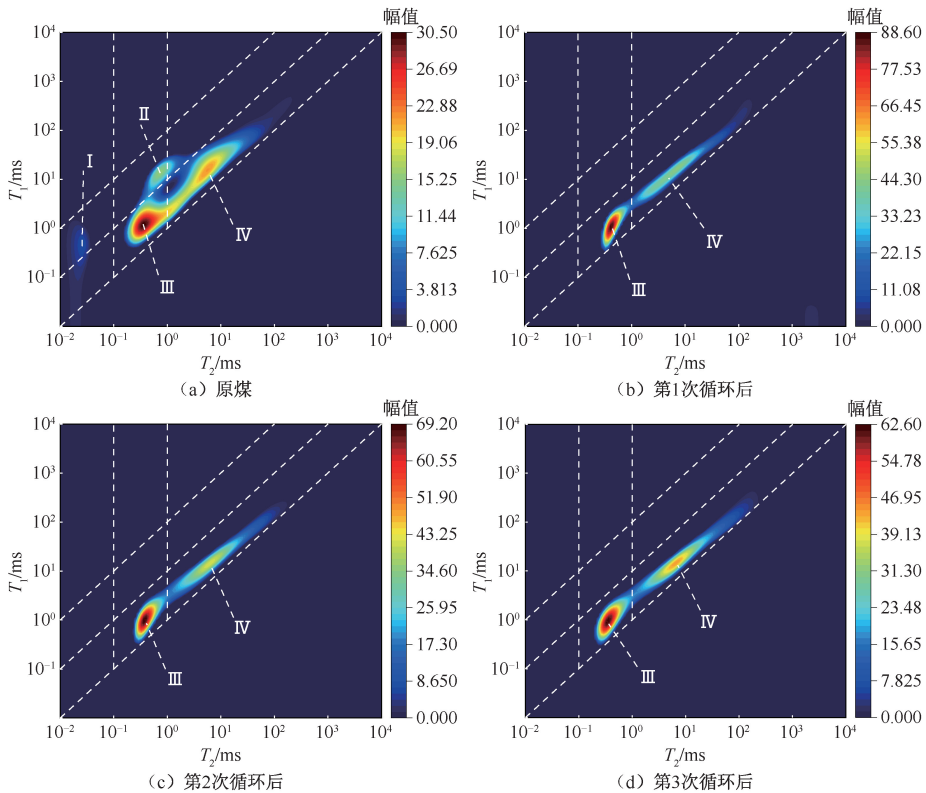


图5 M_0 煤的 T_1-T_2 谱

Fig. 5 T_1-T_2 spectrum of M_0 coal

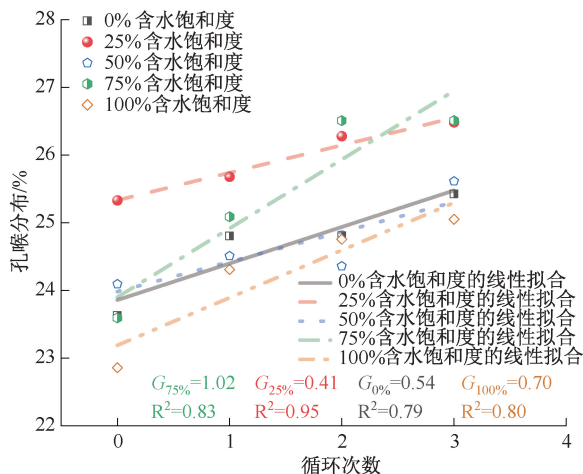


图 6 总孔喉分布变化

Fig. 6 Change of total pore throat distribution

M_{25} 煤的线性拟合度最好,达到了 0.95。 M_0 、 M_{75} 和 M_{100} 煤的线性拟合效果较好,但不及 M_{25} 煤。

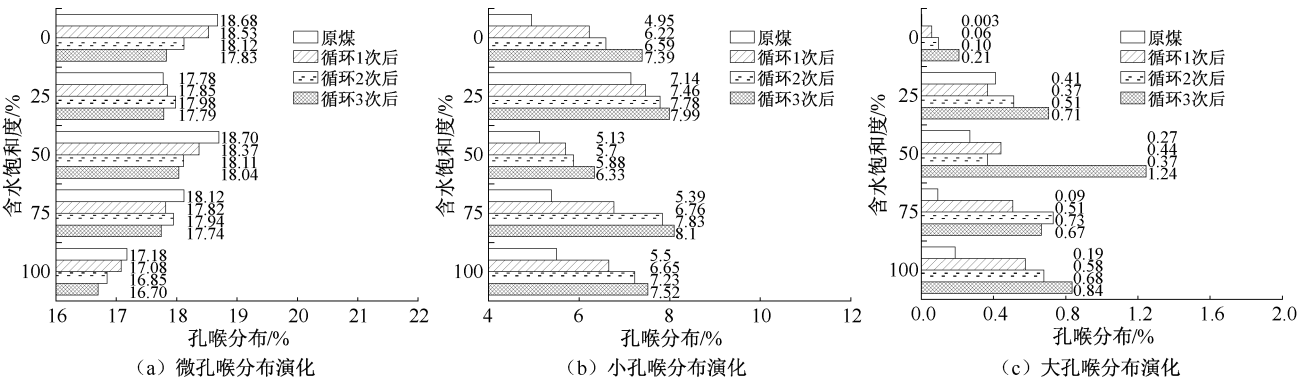


图 7 不同孔喉区间分布变化

Fig. 7 Distribution changes of different types of pore throats

2.3.2 T_2 截止值

煤样的 T_2 截止值演化特征如图 8 所示。 T_2 截止值越高,孔隙闭合度越高。 M_0 和 M_{75} 原煤的 T_2 截止值均达大于 0.4,明显高于其他煤样。第 1 次微波处理后, M_0 和 M_{75} 煤的 T_2 截止值降至 0.2~0.25 之间,二者降幅显著大于其他煤样。之后 2 轮的微波处理中, M_0 和 M_{75} 煤的 T_2 截止值整体降幅与其他煤样保持同一水平。第 3 次微波处理后, M_{25} 和 M_{75} 煤的 T_2 截止值有小幅回升,这表明微孔孔径减小,以及微孔-中孔的连通性减弱影响了孔隙开放度的提高。由此可见:循环微波辐射形成的反复热冲击可以提高含水煤体的孔隙开放度,而且孔隙闭合度越高,作用效果越明显,含水饱和度因素则没有明显影响。

2.4 循环微波作用机制分析

微波对煤的非均匀加热导致煤体内部出现温度

结合前面的分析,说明随着煤样渗透性提高,循环微波的增透效果趋于稳定。 M_{50} 煤在第 2 次微波作用后,孔喉出现异常减少,导致拟合度较低。

为了更好地分析煤样中的孔喉分布变化特征,将孔喉分为微孔喉、小孔喉和大孔喉 3 种区间,其中,微孔喉半径 $r < 0.1 \mu\text{m}$,小孔喉半径为 $0.1 \leq r < 2.5 \mu\text{m}$,大孔喉半径为 $2.5 \leq r < 25 \mu\text{m}$ 。

不同区间孔喉的分布变化情况如图 7 所示,由图 7 可知:经过循环微波辐射后,除 M_{25} 煤外其余煤样的微孔喉均减少,而所有煤样的小孔喉和大孔喉均增加。其中 M_{25} 煤的微孔喉先在 2 轮微波作用后有所增加,然后在第 3 轮微波作用后降至与原煤几乎相同的水平,表明循环微波整体上促使小孔径孔喉向更大孔径更迭,但当煤样的孔隙发育情况较好时,这种促进效果迅速减弱。

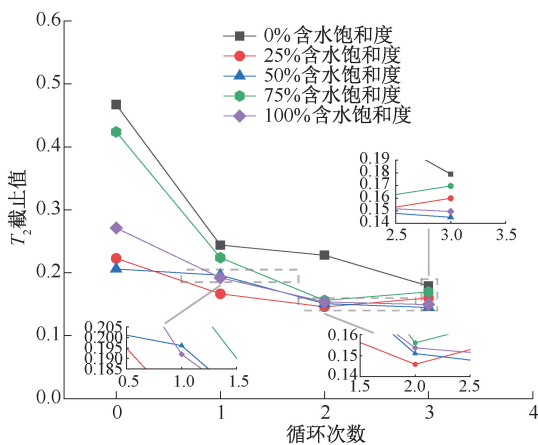


图 8 T_2 截止值变化

Fig. 8 Change of T_2 cutoff value

差异,形成热应力作用。文中试验的 T_2 谱分析表明热应力会导致煤体内部发生热膨胀以及热破裂,从而促进孔隙的扩展发育^[23]。但是,热应力对煤体孔

隙的作用具有两面性。表2中不同孔体积的变化特征就说明煤体的热破裂会导致部分孔隙出现堵塞现象,导致单轮微波处理效果具有波动性。

煤体中的水作为强极性分子,对微波能的吸收作用一般强于周围的煤基质,在促进热应力形成的同时,较高饱和度的水分蒸发也会形成一定的蒸气压,为孔隙的扩展发育进一步提供气压驱动。试验结果表明: M_{75} 煤的增透效果优于 M_{100} 煤,说明这种气压驱动的增透效果有限。由于煤样中的挥发分含量较高,微波对煤的非均匀加热导致煤基质局部热解,既进一步推动热破裂,生成的挥发性气体又能在孔隙闭合度低时提供额外的气压驱动。

循环微波辐射下,低渗透煤体在高含水饱和度时,气压驱动与热应力共同作用显著提高其渗透性。随着渗透性提高,水分的流动性增强,导致其形成的气压驱动迅速减弱。此时循环微波辐射的增透机制有所简化并减弱,其增透效果趋于稳定。

文中试验是在无载荷条件下进行循环微波辐射下含水煤体的孔隙结构演化机制的研究,与实际地下煤层受载荷情况存在一定差异。后续考虑模拟煤层受载荷条件下,探究循环微波辐射对含水煤体的增透作用机制,为下一步实际工程试验做好铺垫。

3 结 论

1) 循环微波辐射下,不同含水煤体中的总孔体积、总孔喉分布均明显增加。由线性拟合总孔喉分布的变化结果发现,高含水饱和度对循环微波的增透效果起促进作用,低含水饱和度则起抑制作用,但是过高的含水饱和度使这种促进效果有所回降。

2) 循环微波辐射下,煤样的 T_2 谱演化特征、不同孔喉区间分布结果表明:循环微波辐射能促使孔径较小的孔隙向更大孔径更迭。诸多试验结果表明:孔隙演化过程中存在孔隙堵塞情况,而提高含水量有利于缓解此现象,促进孔隙贯通。

3) 循环微波辐射下, T_2 截止值较高的 M_0 和 M_{75} 原煤的降幅比其他煤样更明显,表明循环微波辐射可以提高煤体的孔隙开放度,而且孔隙度闭合度越高,微波的作用效果越明显。含水饱和度因素在其中没有展现出明显影响。

4) 循环微波的增透机制可以分为热应力作用和气压驱动2种。渗透性较低时,高含水饱和度煤体的气压驱动效果明显,与热应力共同作用促使煤体渗透性迅速提高。随着渗透性提高,煤体水分对循环微波的增透效果影响减弱。因此,在工程应用中,可以考虑在煤层中注入吸波剂,进一步提高循环微波增透技术的效果。

参 考 文 献

- [1] 罗平亚,朱苏阳. 中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1755-1763.
LUO Pingya, ZHU Suyang. Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1755-1763.
- [2] 李胜,王箫鹤,范超军,等. 冲击载荷作用下煤岩孔隙演化特征试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(10): 91-97.
LI Sheng, WANG Xiaohe, FAN Chaojun, et al. Experimental study on evolution characteristics of coal pores under impact loadings[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(10): 91-97.
- [3] 付江伟,傅雪海,刘琦,等. 低渗高突煤层体系化瓦斯治理关键技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(7): 109-115.
FU Jiangwei, FU Xuehai, LIU Qi, et al. Research on key technologies for systematic control of gas in coal seam having low permeability and high outburst risk[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(7): 109-115.
- [4] 张永利,尚文龙,马玉林,等. 微波作用下煤层渗透性变化规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(8): 48-53.
ZHANG Yongli, SHANG Wenlong, MA Yulin, et al. Experimental study on variation laws of coal seam permeability under microwave[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(8): 48-53.
- [5] 李贺,林柏泉,洪溢都,等. 微波辐射下煤体孔裂隙结构演化特性[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(6): 1194-1201.
LI He, LIN Baiquan, HONG Yidu, et al. Effect of microwave irradiation on pore and fracture evolutions of coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(6): 1194-1201.
- [6] 曹轩. 微波热循环作用对含水煤体的致裂增透特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
CAO Xuan. Study on fracturing and permeability enhancement of water bearing coals under microwave thermal cycling[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [7] LI He, LIN Baiquan, YANG Wei, et al. Experimental study on the petrophysical variation of different rank coals with

- microwave treatment[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 154/155: 82–91.
- [8] 胡国忠,杨南,朱健,等.微波辐射下含水分煤体孔渗特性及表面裂隙演化特征实验研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(增2): 813–822.
HU Guozhong, YANG Nan, ZHU Jian, et al. Evolution characteristics of microwave irradiation on pore-permeability and surface cracks of coal with water: an experimental study[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 813–822.
- [9] 马学舟,温颖远,曹安业,等.微波弱化煤体微结构损伤特征及能量释放规律分析[J/OL]. *煤炭科学技术*: 1–12 [2024-06-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240408.0845.001.html>.
MA Xuezhou, WEN Yingyuan, CAO Anye, et al. Analysis of microstructure damage characteristics and energy release law of coal weakened by microwave[J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1–12 [2024-06-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240408.0845.001.html>.
- [10] 朱健,胡国忠,许家林,等.煤层层理对微波破煤增透效果的影响规律[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(5): 2 324–2 337.
ZHU Jian, HU Guozhong, XU Jialin, et al. Influence of coal seam bedding on the effect of fracturing coal and enhancing permeability by microwave[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(5): 2 324–2 337.
- [11] 林柏泉,钟玉婷,曹轩,等.循环微波辐射下煤体孔裂隙结构演化特征[J]. *西安科技大学学报:自然科学版*, 2021, 41(6): 964–972.
LIN Baiquan, ZHONG Yuting, CAO Xuan, et al. Effect of cyclic microwave irradiation on pore and fracture evolutions of coal[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology: Natural Sciences Edition*, 2021, 41(6): 964–972.
- [12] 杨新乐,姜涛,苏畅,等.脉动微波循环注热开采煤层气数值模拟[J]. *微波学报*, 2021, 37(4): 89–94.
YANG Xinle, JIANG Tao, SU Chang, et al. Numerical simulation of coalbed methane extraction by pulsation cycle microwave heat injection[J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(4): 89–94.
- [13] HUANG Jinxin, XU Guang, LIANG Yunpei, et al. Improving coal permeability using microwave heating technology: a review[J]. *Fuel*, 2020, 266: DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117022.
- [14] 张连昆.微波循环作用改变煤结构及煤甲烷吸附性能的研究[D].太原:太原理工大学, 2022.
ZHANG Liankun. Research on the influence of cyclical microwave treatment on coal structure and methane adsorption in coal[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [15] 董超,王恩元,晋明月,等.微波作用对煤微观孔隙影响的研究[J]. *煤矿安全*, 2013, 44(5): 49–52.
DONG Chao, WANG Enyuan, JIN Mingyue, et al. Research on the effect of microwave on coal micro porous[J]. *Safety in Coal Mines*, 2013, 44(5): 49–51, 52.
- [16] GB/T 42035—2022, 煤和岩石孔径分布的测定 核磁共振法[S].
GB/T 42035—2022, Determination of pore size distribution of coal and rock-nuclear magnetic resonance[S].
- [17] 徐吉钊,翟成,桑树勋,等.基于低场核磁共振技术的液态 CO₂ 循环致裂煤体孔隙特征演化规律[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3 578–3 589.
XU Jizhao, ZHAI Cheng, SANG Shuxun, et al. Pore evolution of coals affected by cyclical liquid CO₂ fracturing based on the low-field nuclear magnetic resonances[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3 578–3 589.
- [18] 屈翠侠,刘永河,宋宏业,等.泥页岩储层孔隙度测量方法分析与评价[J]. *物探化探计算技术*, 2023, 45(6): 698–706.
QU Cuixia, LIU Yonghe, SONG Hongye, et al. Comparison of measurement methods for porosity of the shale reservoir[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 45(6): 698–706.
- [19] 李天,任大忠,甯波,等.煤层孔隙结构多尺度联合表征及其对可动流体的影响[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(4): 569–582.
LI Tian, REN Dazhong, NING Bo, et al. Multi-scale joint characterization of coal seam pore structure and its influence on movable fluid[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(4): 569–582.
- [20] HE Jiawei, LI He, LU Jiexin, et al. Variations in the pore structure and fluid mobility under anionic surfactant assisted matrix acidification of coal based on nuclear magnetic resonance T_1 - T_2 spectra[J]. *Fuel*, 2024, 355: DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129488.
- [21] 林海飞,罗荣卫,李博涛,等.液氮冻融含水煤体孔隙损伤规律实验研究[J]. *西安科技大学学报:自然科学版*, 2023, 43(1): 55–64.
LIN Haifei, LUO Rongwei, LI Botao, et al. Experimental research on pore damage law of water-contained coal caused by liquid nitrogen freeze-thaw[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology: Natural Sciences Edition*, 2023, 43(1): 55–64.
- [22] WU Xi, LI He, LU Jiexin, et al. Investigation of cross-scale characterization of porous structure and fluid index in bituminous coal via microwave-LN₂ freeze-thaw cycles[J]. *Fuel*, 2024, 357: DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129701.
- [23] LU Jiexin, LI He, SHI Shiliang, et al. Microwave-induced microstructure evolution of coal and its effects on the methane adsorption characteristic[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(5): 4 081–4 090.

作者简介: 李贺 (1990—),男,山东济宁人,博士,教授,博士生导师,主要从事煤基甲烷资源化开发与防灾、非常规油气安全高效开发、防火防爆与应急处置等方面的研究。E-mail: lihecumt@126.com。

