

煤层层理对微波破煤增透效果的影响

朱 健^{1,2}, 胡国忠^{1,2}, 许家林^{1,2}, 杨 南^{1,2}, 王同辉^{1,2}, 王宏图³, 秦 伟²

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044)

摘 要:层理作为一种典型的结构弱面普遍存在于煤层之中, 煤层层理与煤基质之间的相对力学性能是决定层理发育煤层微波增透效果的关键。为此, 采用自主研发的微波辐射试验装置, 对层理面与加载方向之间夹角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 的煤样开展了微波破煤试验, 探究了不同层理方向煤样微观孔隙结构与细观裂隙的演化特征, 揭示了微波辐射下层理对煤体孔裂隙结构的数量、尺度与连通性的影响规律; 对比分析了微波辐射前、后不同层理方向煤体的气体渗透特性, 阐明了煤体在煤层层理与微波破煤叠加影响下的渗透率变化规律, 揭示了煤层层理对微波破煤增透的影响机制。结果表明: ①煤层层理对微波破煤增透效果的影响显著, 层理面与加载方向之间夹角越大, 微波辐射下煤体的束缚孔减少幅度与连通性裂隙增长幅度也更大; 与原煤样相比, 微波辐射后不同层理方向煤样渗透率之间的数量级差异有效减小, 渗透率各向异性弱化明显。②微波辐射下煤体中细观裂隙发育具有显著的层理效应, 具体演化过程为: 沿层理面原生裂隙扩展→新的沿层理面裂隙萌生→与层理面相交的裂隙扩展。③煤基质与层理面的介电损耗和传热性质差异, 使得微波对煤体的热应力分布受制于层理面。当层理面与加载方向垂直或平行时, 煤体以张拉破坏为主; 当层理面与加载方向斜交时, 煤体以剪切滑移破坏为主。

关键词:微波破煤增透; 煤层层理; 结构损伤; 渗透特性; 层理方向

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)05-2324-14

Influence of coal seam bedding on the effect of fracturing coal and enhancing permeability by microwave

ZHU Jian^{1,2}, HU Guozhong^{1,2}, XU Jialin^{1,2}, YANG Nan^{1,2}, WANG Tonghui^{1,2}, WANG Hongtu³, QIN Wei²

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of China Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: As a typical structural weak surface, bedding is ubiquitous in coal seams. The relative mechanical properties between coal seam bedding and coal matrix are the key to determining the effect of enhancing permeability by microwave in coal seams with bedding development. To this end, a self-developed microwave irradiation (MI) test device was used to carry out microwave fracturing coal experiments on coal samples with an angle of 0° , 30° , 45° , 60° and 90° between the bedding plane and the loading direction. The evolution characteristics of microscopic pore structure and microscopic

收稿日期: 2023-04-21 修回日期: 2023-10-18 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0526

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U22A20169, 51974044); 江苏高校“青蓝工程”资助项目 (苏教师函[2024]2号)

作者简介: 朱 健 (1997—), 男, 山西寿阳人, 博士研究生。E-mail: ZhuJian@cumt.edu.cn

通讯作者: 胡国忠 (1981—), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: gzhu@cumt.edu.cn

引用格式: 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[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2324-2337.

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): 2324-2337.



移动阅读

cracks of coal samples with different bedding directions were explored, and the influence of bedding structure on the number, scale, and connectivity of coal pores and fractures under MI was revealed. The gas permeability characteristics of coal in different bedding directions before and after MI were compared and analyzed. The variation law of coal permeability under the influence of coal seam bedding and fracturing coal by microwave was clarified, and the influence mechanism of coal seam bedding on fracturing coal and enhancing permeability by microwave was revealed. The results show that the coal seam bedding has a significant effect on the effect of fracturing coal and enhancing permeability by microwave. The larger the angle between the bedding plane and the loading direction, the greater the reduction of the bound pores and the growth of the connected fractures of the coal under MI. Compared with the original coal samples, the order of magnitude difference between the permeability of coal samples in different bedding directions after MI is effectively reduced, and the permeability anisotropy is obviously weakened. The development of meso-cracks in coal under MI has a significant bedding effect. The specific evolution process is first to expand the original cracks along the bedding plane, followed by the initiation of new cracks along the bedding plane, and finally to expand the cracks intersecting with the bedding plane. The difference of dielectric loss and heat transfer properties between coal matrix and bedding plane makes the thermal stress distribution of coal subject to the bedding plane. When the bedding plane is perpendicular or parallel to the loading direction, the coal body is dominated by tensile failure. When the bedding plane is oblique to the loading direction, the coal body is dominated by shear slip failure.

Key words: fracturing coal and enhancing permeability by microwave; coal seam bedding; structural damage; permeability characteristics; bedding direction

煤层瓦斯预抽是防治瓦斯灾害、开发瓦斯资源与矿区温室气体减排的有效方法之一。然而,我国95%的高瓦斯和突出矿井开采的煤层渗透性较低^[1],且吸附瓦斯在抽采过程中难以解吸^[2],导致瓦斯抽采率普遍较低。近年来,微波破煤卸压增透方法以其特有的促进煤层瓦斯解吸^[3]和破煤卸压增透^[4]的双重效应,特别是在提高单孔瓦斯抽采量、缩短瓦斯抽采达标时间等方面的优势,受到了国内外学者的广泛关注。

在微波辐射下,煤体将产生整体热效应与差异性热效应,使煤体快速升温而产生剧烈的热应力,造成煤体热破裂^[5-7]。一方面,煤体温度升高,能够有效促进煤体内的瓦斯解吸,加速自由瓦斯的流动^[6,8];另一方面,微波对煤体的破煤效应,不仅造成煤体孔裂隙结构损伤、提高煤体内孔裂隙发育水平,同时还弱化了煤体的强度^[9-10]、使得微波破煤范围内的煤体应力向煤体深处转移,从而产生卸压作用、提高煤层透气性。此外,微波辐射还将引起煤体中含氧官能团和脂肪烃等的分解^[11],其产生的高温蒸气压、含硫气体与热解气体会对煤体微结构造成损伤^[11-13]。关于这一方法,已有文献研究了微波注热后煤体内部介质传热、应力演化及气体渗流之间的内在联系^[5,14-15],以及微波辐射下煤的甲烷吸附特性^[3]、介电各向异性、煤体热力学机制^[16]、热解过程的微波吸收能力^[17]、含水分煤体的微波致裂特性^[18]、微波能量组合方式^[19]以及微波馈入天线的设计方法^[20]等,以上研究成果为低渗

透煤层微波破煤卸压增透技术的研发发挥了积极作用。

已有研究发现,微波参量、煤质和地应力环境是影响微波破煤增透效果的主要因素^[4,21-22]。然而,层理作为一种典型的结构弱面普遍存在于煤层之中^[23],使得煤层呈现强烈的各向异性,并对煤体的物性、力学性能与气体渗流特性产生显著影响^[24-26]。因而,在对层理发育的煤层进行微波破煤增透过程中,煤层增透效果除了受微波参量、煤质和地应力环境的影响之外,还取决于煤层层理与煤基质之间的相对力学性能。在煤层层理与微波破煤的叠加影响下,煤体孔裂隙结构将产生多大的损伤,以及煤体的气体渗流特性如何变化,是决定层理发育煤层微波增透效果好坏的关键。为此,笔者采用煤岩体微波辐射试验装置,对层理面与加载方向的夹角为0°、30°、45°、60°和90°的煤样开展了微波破煤试验,探究了煤体层理结构及其方向对微波破煤增透效果的影响规律,以期对微波破煤增透效果评价与工艺设计提供理论基础。

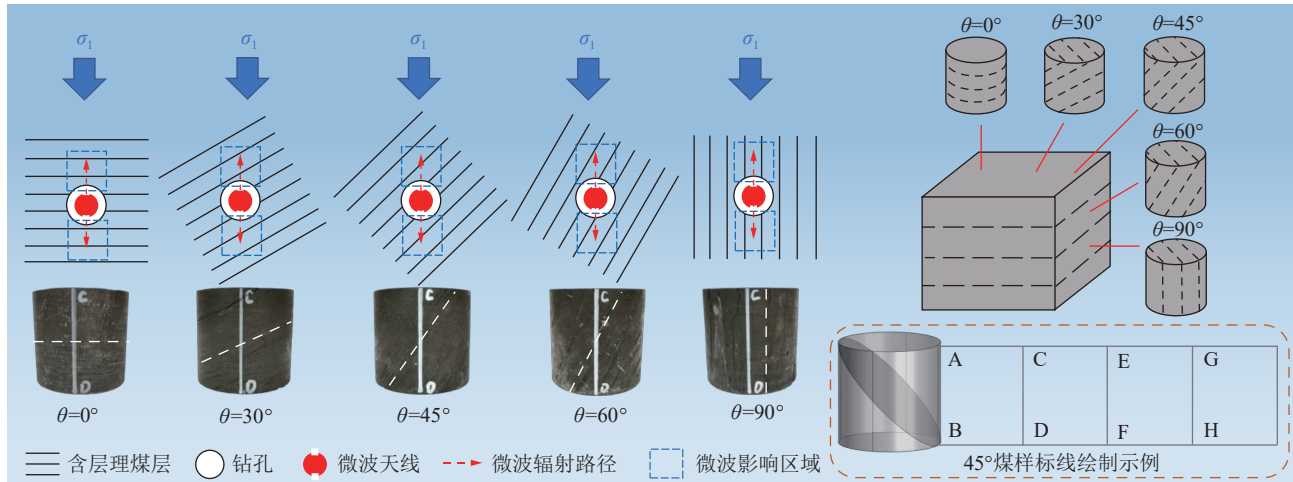
1 试验方法

1.1 煤样制备

试验原煤取自陕西榆林某矿煤巷掘进工作面,选取层理发育的大块原煤,使用密封膜包覆后送往实验室制样。考虑到实验室压力机加载方向不能改变的实际情况,为模拟煤层层理面与地应力方向之间存在

的不同空间关系, 决定通过设定不同的取心角度, 钻取不同层理方向的煤样试件 ($\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$) 来满足试验条件; 此时, 层理面与应力加载方向之间的夹角与煤样层理方向互为余角。同时, 为减少煤样之间

的差异性, 对钻取的煤样进行超声波波速测定, 将同一层理方向煤样中波速相近的分为一组, 并对煤样进行称重、尺寸测量和画标线, 取样工程背景及煤样制备过程如图 1 所示。



注: σ_1 为媒体所受的主应力, 下方箭头为主应力方向; θ 为媒体层理相对于水平面的角度。

图 1 取样工程背景及煤样制备示意

Fig.1 Sampling engineering background and schematic diagram of coal samples preparation

为避免煤样含水率不同造成试验误差, 将制备好的煤样放置在干燥通风处平衡水分 10 d。本次试验煤样的物理力学参数见表 1、2。

表 1 不同层理方向煤样单轴抗压强度

Table 1 Uniaxial compressive strength of coal samples with different bedding angles

层理方向/(°)	0	30	45	60	90
单轴抗压强度 P/MPa	36.42	22.34	10.36	14.15	19.01

表 2 试验煤样工业性分析结果

Table 2 Proximate analysis of coal samples %

煤阶	M_{ad}	A_{d}	V_{daf}	FC_{d}
褐煤	3.10	3.09	34.17	63.80

1.2 试验方案

考虑到煤样孔裂隙结构表征测试的要求, 在微波破煤试验过程中需要保持煤样不完全破坏。由前期预实验结果表明, 微波辐射后各层理方向煤样的峰值单轴抗压强度 P_1 较原煤样的单轴抗压强度 P 降低了约 1/2; 而当轴向载荷 $\sigma_y \leq (2/3)P_1$ 时, 煤体变形以弹性变形为主, 能够保证微波辐射过程中轴向载荷对不同层理方向煤体变形的影响权重相近。另外, 由于煤样之间天然的差异性带来测试结果的不同, 需通过设定安全系数 C 来确保所有煤样在微波辐射过程中不会被轴向载荷破坏, 根据试验经验, C 取值 0.5, 从而得到试验中对煤样施加的相对轴向载荷 $\sigma_y = (2/3)P_1C = (1/6)P$ 。

试验以研究在微波辐射下, 煤样层理面与应力加载方向呈不同空间关系时的孔裂隙结构演化与渗透率变化规律为主要目的, 采用对比试验方法, 对 0°、30°、45°、60°、90°这 5 种层理方向的试样在设定载荷下进行了微波辐射试验。微波辐射功率为 5 kW, 辐射时间为 30 s, 试验规定了煤样的统一放置方法为层里面垂直投影与微波辐射方向正交, 微波辐射试验方案见表 3。

表 3 微波辐射试验方案

Table 3 Experimental scheme of microwave irradiation

煤阶	层理方向/(°)	煤样	相对轴向载荷/MPa	功率/kW	辐射时间/s
褐煤	0	H-0-1~3	6.07	5	30
	30	H-30-1~3	3.72	5	30
	45	H-45-1~3	1.73	5	30
	60	H-60-1~3	2.36	5	30
	90	H-90-1~3	3.17	5	30

通过核磁共振法 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 和计算机断层扫描技术 (Computed Tomography, CT) 对微波辐射前后不同层理方向煤样的孔裂隙结构进行测定, 而后采用稳态渗流法对试验煤样进行渗透率测试, 试验流程如图 2 所示。

2 微波辐射下不同层理方向煤体的孔隙结构演化规律

低场核磁共振是一种精细化、无损化和量化的

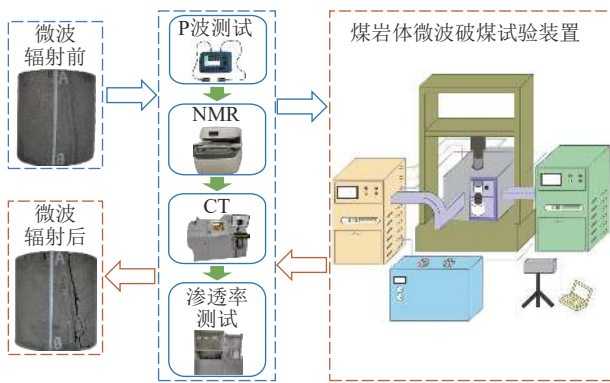


图 2 试验流程

Fig.2 Test flow chart

检测技术,该技术主要通过测试多孔介质中的含 H 流体在外加磁场下的弛豫过程,当孔隙中仅存在一种流体时,核磁共振总的横向弛豫速率^[27-28]则可以表示为

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right) \quad (1)$$

式中, T_2 为弛豫时间, ms; ρ_2 为横向表面弛豫强度, $\mu\text{m}/\text{ms}$; S 为孔隙表面积, cm^2 ; V 为孔隙体积, cm^3 。

由式 (1) 可知,孔隙尺寸与横向弛豫时间成正比关系,即横向弛豫时间越长,孔隙半径越大。通过 T_2 谱分布特征可以将煤体的孔隙结构划分为小孔 (0.01~10 ms)、中孔 (10~100 ms)、大孔 (100~1 000 ms) 与裂隙 (> 1 000 ms)^[29-30],根据核磁共振 T_2 谱分析可以得到煤样的孔隙度、孔径分布、孔连通性等物性特征^[31]。试验中利用真空饱水装置和真空干燥方式分别对试验煤样开展饱和水条件和残余水条件下的核磁共振测试,反演得到的 T_2 谱能够分别反映煤体内的全尺寸孔隙信息和水分难以脱出的小孔与闭合孔的分布信息。

2.1 孔隙演化定性分析

微波辐射前后煤样在饱和水与残余水条件下的 T_2 谱分布情况如图 3 所示。微波辐射前后煤样的残余水 T_2 谱均呈单峰分布,而且微波后的残余水 T_2 谱面积较微波前有明显减小,此外 T_2 谱的下降段向左移动,这表明微波辐射后煤样中束缚孔的体积与数量都得到了减小。饱和水 T_2 谱在微波辐射后由双峰结构转变为三峰分布,在小孔范围内的谱面积有一定减小,说明微波辐射后煤体中的部分小孔发生了转化;在中孔和大孔范围内,微波后的 T_2 谱面积均有一定的提高,其中大孔更为突出,表明微波辐射后的煤样内部新生了大量的大孔与裂隙。通过微波前后 T_2 谱的演变以及结合现有研究^[19, 32],初步判断煤样中的小孔在微波辐射后转变为中大孔。

图 4 为不同层理方向煤样在微波辐射前后核磁

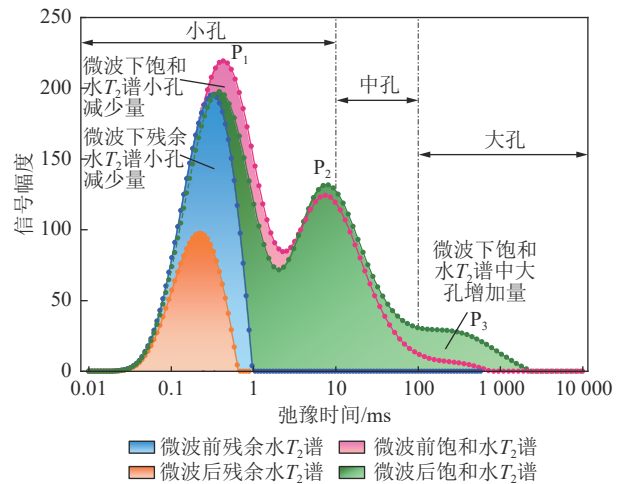


图 3 微波辐射前后煤样饱和水 T_2 谱和残余水 T_2 谱对比

Fig.3 Comparison of T_2 spectrum at saturated water and residual water before and after microwave irradiation

共振 T_2 谱的演化规律,5 种层理方向的煤样在原始状态下的饱水 T_2 谱呈双峰分布, P_2 峰小于 P_1 峰,而当弛豫时间大于 1 000 ms 时,信号强度基本为零,表明 5 种层理方向原始煤样内部以中小孔为主,大孔极少。原始煤样的饱水 T_2 谱首峰略大于干燥状态,甚至在大部分煤样中表现为基本相同,这就表明试验所用煤样中小孔基本属于封闭状态 (约占 90% 以上),流体难以进入与通过,这类孔也称之为束缚孔,相对应地可以为流体提供扩散通道的定义为渗流孔,其余为裂隙^[33]。

经微波辐射后各层理方向煤样的 T_2 谱发生了较大变化,其中 0°煤样的残余水 T_2 谱首峰 P_1 下降明显,平均减小量超过 50%,意味着 0°煤样在微波辐射后微小孔减少量最大。此外,微波辐射后的饱水 T_2 谱在弛豫时间为 100~1 000 ms 的大孔范围出现了第 3 个谱峰 P_3 ,不过 P_3 的峰值相对较小,峰状结构不突出,可见在该试验条件下大孔的发育水平小于中小孔,但微波辐射对于提高煤体内部中大孔之间连通性的作用十分可观。

2.2 孔隙演化定量分析

对试样核磁共振测试数据进行标准化处理,微波辐射前后不同层理方向煤样在干燥与饱水状态下的核磁共振 T_2 谱面积及其峰占比见表 4。

微波辐射前不同层理方向煤体在干燥状态下的 T_2 谱 P_1 面积占比均在 99% 以上,反映了原始煤体中闭合孔以小孔为主。在微波辐射后,占比最大的 P_1 面积都得到了不同程度的减少,表明煤体中的束缚小孔数量得到了减少,其中 0°煤样减少得最多,减少率达到 61%,90°煤样最少,为 24%,大幅减少了瓦斯在煤体中的吸附位^[34],对于促进瓦斯解吸具有积极作用。此外,在微波后部分煤样中出现了 P_2 和 P_3 占比增大的现象

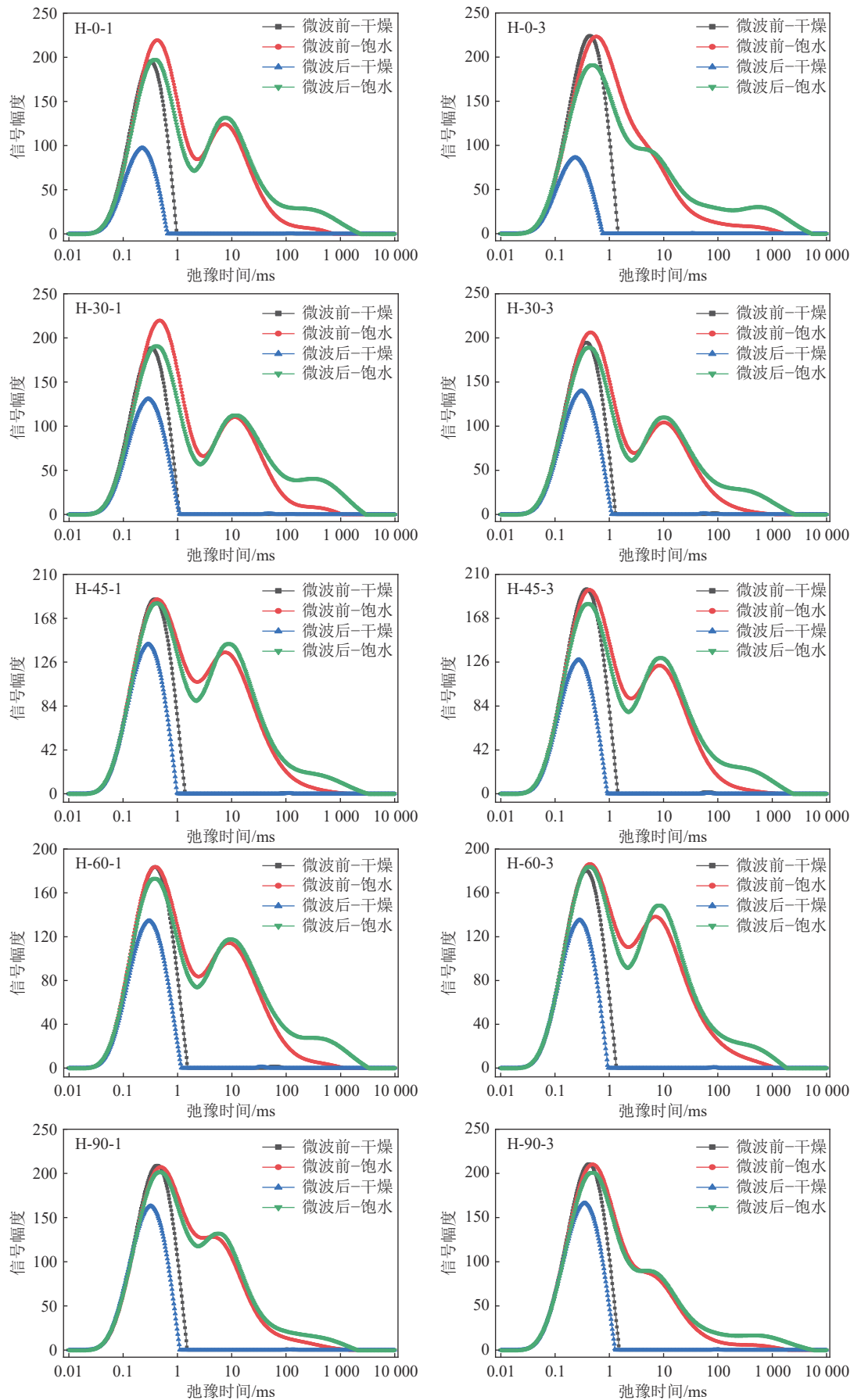
图4 微波辐射前后煤样核磁共振 T_2 谱分布情况Fig.4 T_2 spectrum of coal samples before and after microwave irradiation

表 4 干燥和饱水状态下煤样 T_2 谱面积
Table 4 T_2 spectral area of coal samples under dry state and saturated state

煤样状态	层理方向/(°)	试验状态	总峰面积	P ₁ 面积	P ₁ 占比/%	P ₂ 面积	P ₂ 占比/%	P ₃ 面积	P ₃ 占比/%	
干燥	0	微波前	14 047.53	14 046.68	99.99	0	0	0.85	0.01	
		微波后	5 529.31	5 526.05	99.94	1.29	0.02	1.97	0.04	
	30	微波前	13 054.42	13 039.11	99.88	8.97	0.07	6.35	0.05	
		微波后	9 181.22	9 167.25	99.85	13.97	0.15	0	0	
	45	微波前	13 601.67	13 578.30	99.83	19.96	0.15	3.41	0.03	
		微波后	8 890.84	8 884.01	99.92	4.42	0.05	2.41	0.03	
	60	微波前	13 080.38	13 060.45	99.85	19.93	0.15	0	0	
		微波后	9 081.76	9 070.95	99.88	10.54	0.12	0.28	0	
	90	微波前	14 969.10	14 956.90	99.92	4.98	0.03	7.21	0.05	
		微波后	11 342.90	11 337.36	99.95	2.18	0.02	3.36	0.03	
	饱水	0	微波前	29 169.97	24 919.84	85.43	3 655.41	12.53	594.72	2.04
			微波后	29 911.68	22 489.98	75.19	4 696.72	15.70	2 724.98	9.11
30		微波前	28 847.55	22 683.49	78.63	5 550.54	19.24	613.52	2.13	
		微波后	30 090.33	20 756.62	68.98	6 331.51	21.04	3 002.21	9.98	
45		微波前	29 935.96	23 507.45	78.53	5 886.39	19.66	542.12	1.81	
		微波后	30 986.13	22 344.30	72.11	6 645.69	21.45	1 996.15	6.44	
60		微波前	29 557.67	22 898.85	77.47	5 896.28	19.95	762.53	2.58	
		微波后	30 789.11	21 890.87	71.10	6 614.63	21.48	2 283.61	7.42	
90		微波前	28 435.11	24 504.13	86.18	3 365.43	11.84	565.54	1.99	
		微波后	29 374.87	23 819.25	81.09	3 932.02	13.39	1 623.60	5.53	

(如 0°和 30°煤样), 分析原因可能是由于微波辐射煤体引起的塌孔效应^[32], 在煤体内部形成了少量中、大密闭孔隙。微波辐射下煤体中的孔隙演化过程如图 5 所示。

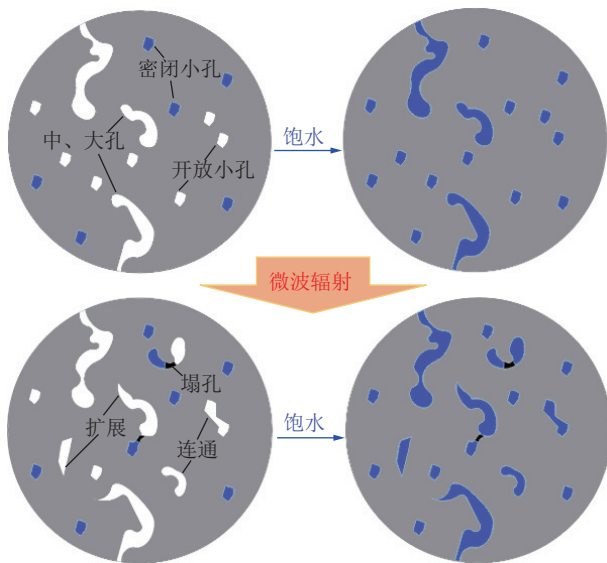


图 5 微波辐射下煤体孔隙演化示意

Fig.5 Pore evolution diagram of coal before and after microwave irradiation

由表 4 可知, 微波辐射前饱水煤样 T_2 谱中 P_1 和 P_2 占比较大, 表明原始煤体中微小孔非常发育, 中孔次之 (占 11.84%~19.95%), 大孔及裂隙的发育水平则极低 (占 1.81%~2.58%)。在微波辐射后, 各层理方向煤样 T_2 谱呈三峰分布, 总谱面积明显增加 (平均增长 2.54%~4.31%), 是由于煤体经微波辐射后产生了新的孔裂隙, 或是原有孔隙得到了扩展与连通 (图 5), 煤体内总的孔隙体积得以增加。这个过程伴随有 P_1 面积的减少与 P_2 和 P_3 面积不同程度地增加; 其中 0°煤样 P_1 面积减少量最大, 达到 9.75%, 而 90°煤样的减少量最小, 仅为 2.79%。

各层理方向煤样在微波辐射后束缚孔的减小量随层理方向的增加而减少, 即对 0°煤体中束缚孔的破坏效果最优; 而在渗流孔范围内 (中孔与大孔), 谱峰面积的增加量大体上随层理方向的增加而减小, 表现为层理倾角小的煤体中渗流孔发育较好。

此外, T_2 截止值是计算储层中可动流体或束缚流体含量的重要基础参数, 同时也是定量评价储层孔隙结构与其渗透率等特性的关键指标^[35]。图 6 为微波辐射前后煤样 T_2 截止值随层理方向的变化情况。原始煤样的 T_2 截止值分布于 0.6~1.1 ms, T_2 截止值整

体呈随层理方向增大而增大的趋势。经微波辐射后,各层理方向煤样的 T_2 截止值与微波辐射前的变化趋势大体相同, T_2 截止值总体降低了约 50%, 微波辐射对于煤体中渗流孔数量的提升有显著作用。

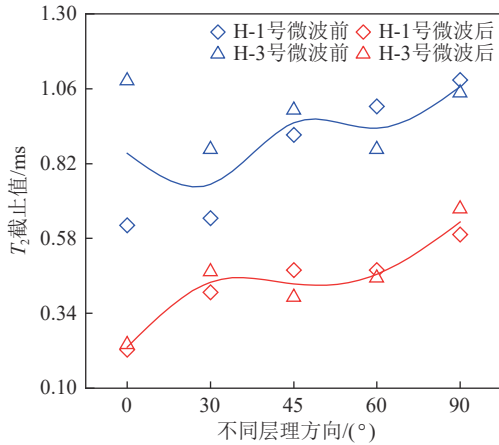


图6 微波辐射前后煤样 T_2 截止值

Fig.6 $T_{2\text{ cutoff}}$ of coal samples before and after microwave irradiation

将不同层理方向煤体在微波辐射前后的 T_2 截止值减小率进行了统计, 结果如图7所示。

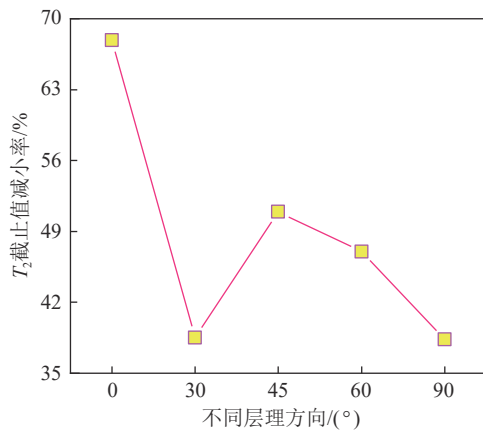


图7 微波辐射后煤样 T_2 截止值变化情况

Fig.7 Change of $T_{2\text{ cutoff}}$ of coal samples after microwave irradiation

其中 0° 煤样的 T_2 截止值减小率最大, 达到 67.88%, 而 90° 煤样的减小率最小, 为 38.35%。通过变化曲线可以看出, 除 30° 煤样外, 微波辐射下 T_2 截止值减小幅度与层理倾向呈负相关。

综上分析, 煤样在外部轴向载荷作用下, 经 5 kW、30 s 的微波辐射, 层理方向小的煤样表现出更好的孔隙提升特点。

3 微波辐射下不同层理方向煤体的裂隙结构演化特征

含瓦斯储层是由孔隙与裂隙组成的双重结构系

统^[36]; 煤体中孔隙孔径小、数量多, 为瓦斯的储集提供了充足空间; 而裂隙系统则是流体运移的主要通道, 裂隙的结构与形态会直接影响瓦斯在煤体中的流态, 微波辐射后不同层理方向煤体的裂隙演化规律将直接影响煤体的渗流特性。

为实现微波辐射下不同层理方向煤样内部裂隙结构的精准表征, 试验对微波辐射前后 0° 、 45° 和 90° 煤样进行了 CT 扫描测试。对裂隙结构进行提取与三维重构, 定性、定量分析不同层理方向煤体在微波辐射下的裂隙演化特征。重构后的三维数字岩心如图8(a)所示, 轴向不同位置的 CT 扫描切片如图8(b)所示, 图8(c)为 CT 扫描切片图像经中值降噪、阈值分割、去除噪点等^[37]得到的裂隙提取结果。

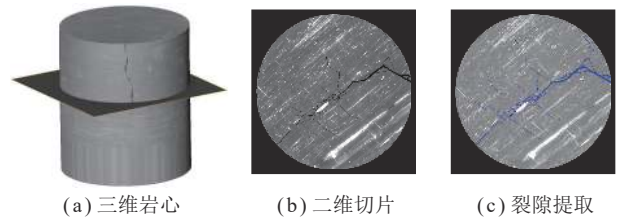


图8 CT扫描图像处理过程

Fig.8 CT scanning image processing process

3.1 二维裂隙演化规律分析

在煤样轴向等距离选取 5 个位置的 CT 扫描切片图像进行分析研究, 分别将其定义为 S1、S2、S3、S4、S5。微波辐射前后 0° 、 45° 和 90° 煤样的二维裂隙演化过程如图9所示。

0° 煤样在微波辐射前裂隙发育水平极低, 煤样完整性好。经微波辐射后, S1 中的裂隙 F1 和 F2 较原始形态进一步扩展, 并在中部形成了局部裂隙网 N1; 在 S2 和 S3 中原生裂隙 F3 和 F4 的张开度与延展度进一步提高, 并与新生裂隙相互贯通, 形成了“Y”形裂隙网 N2 与 N3。通过裂隙形态可以判断 F1、F3 和 F4 是在煤样中轴向发育的裂隙面, 该裂隙面在微波辐射后由 S3 延伸到 S4; 此外 N1~N3 也将形成轴向贯通的裂隙网, 并截止于 S4。

45° 煤样在微波辐射前含有较多的微小裂隙, 其走向大都沿层理的延展方向。在微波辐射后, S1、S2、S3 和 S5 中有 7 条主裂隙均为原生裂隙在层理方向的进一步扩展。此外通过 S1 和 S5 可以明显看出, 微波辐射后煤样顶部和底部的部分裂隙出现了闭合现象, 这是由于煤样在微波辐射过程中矿物质出现熔融热解^[38], 同时 S1、S5 与垫块直接接触, 在外部轴向载荷作用下易产生应力集中, 使得原生裂隙被压密。由此可见煤体在外部应力环境中, 微波辐射不只有致裂损伤的正向作用, 还伴随有闭合裂隙的负向作用。煤体

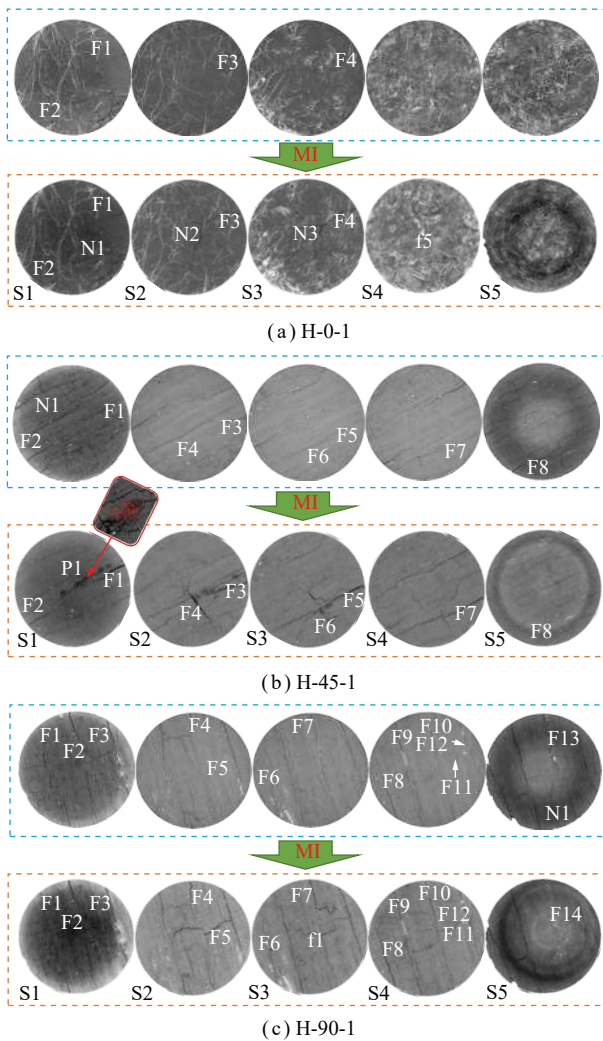


图 9 微波辐射下煤样二维裂隙演化过程
Fig.9 2D fracture evolution of coal samples under microwave irradiation

中的层理面多为腐植质填充,煤基质中则含有石英、高岭土、黄铁矿等矿物^[39],其中极性矿物颗粒在微波高温下发生熔融是 S1 中灼点 P1 产生的主要原因;另外微波的选择性加热特性在极性矿物颗粒与其他矿物之间产生的热应力克服自身胶结力,最终在灼点周围形成“烟花”状裂隙网。随着微波能量的馈入,煤样中的热应力对与层理面相交的原生裂隙进一步扩展,但当馈入的微波能量达到极值后,裂隙的发育将受制于层理面。

90°煤样中有由 F1、F2 和 F3 在轴向构成的原生裂隙面,这种整体性的裂隙大多是在采动过程中形成的。同 45°煤样一样,90°煤样的原生裂隙大部分沿层理方向,少数小裂隙、隐裂隙垂直于层理面。在微波辐射后,S1 中 F1、F2 和 F3 的裂隙宽度细微增加;S2 中垂直于层理面的 F5 在微波辐射前是隐裂隙,而在微波辐射后,其张开度大幅提高,并在轴向向下发育

形成 S3 中的裂隙面 f1,形成的裂隙面首尾都截止于 F1 和 F3,表明原生裂隙面对与其相交的新生裂隙的扩展会有阻碍作用,也反映出在相交于原生裂隙面的位置进行微波致裂所需的微波能量是超过本试验条件的。

通过对微波辐射前后煤样的二维 CT 扫描图像分析发现,0°煤样内部原生裂隙最少,90°煤样最多。由于裂隙是瓦斯的主要运移通道,而原生裂隙大都沿层理的延展方向发育,这将成为不同层理方向煤体渗透率各向异性的主要原因。当煤样在轴向载荷作用下进行微波辐射时,裂隙首先在原生沿层裂隙的基础上进行扩展,其次为对穿层裂隙的扩展,而裂隙的扩展会由于微波能量的限制而截止于层理面或原生裂隙面。

煤样经微波辐射后,煤体内部不同层位的裂隙发育特征各不相同,为了清晰地了解煤样内部裂隙的数量与分布复杂程度,笔者将对 CT 扫描切片进行二维裂隙分形维数计算,而计算图像分形维数常用的实用方法是计盒维数法:

$$D = -\lim_{L \rightarrow 0} \frac{\lg N(L)}{\lg L} \quad (2)$$

式中, D 为二维分形维数; L 为小格子边长; $N(L)$ 为小格子覆盖曲线部分的小格子数。

不同层理方向煤样轴向 CT 扫描切片的分形维数分布规律如图 10 所示,切片序号从 1~1551 代表 CT 扫描煤样时至上而下的计数,从图 10 可以看出,微波辐射后各层理方向煤样的二维 CT 扫描切片分形维数整体得到了提高。

0°煤样不同切片位置的分形维数增长幅度不尽相同,表明微波辐射对 0°煤样的致裂损伤作用是复杂的。在切片序号靠前和靠后位置的微波辐射后分形维数会出现与原始分形维数相近甚至降低的现象,说明该处煤体在微波辐射后存在裂隙不发育甚至裂隙减少或闭合的情况,这与图 9(a) 现象一致。微波辐射前后 45°煤样的二维分形维数曲线之间的增量随切片数的增加呈减小趋势,表明 45°煤样的中上部裂隙发育水平高于中下部。而 90°煤样在微波辐射后的二维分形维数曲线与原始曲线相比整体提高,表明微波辐射对 90°煤样的致裂损伤作用是整体性的。

3.2 三维裂隙演化特征分析

煤体裂隙的空间分布是影响其强度与渗透性的重要因素,通过图像处理技术对试样的三维裂隙进行精准提取,对三维重构的数字煤心进行渲染与裂隙体积量化统计(等效裂隙体积法^[40])。对煤样中的独立

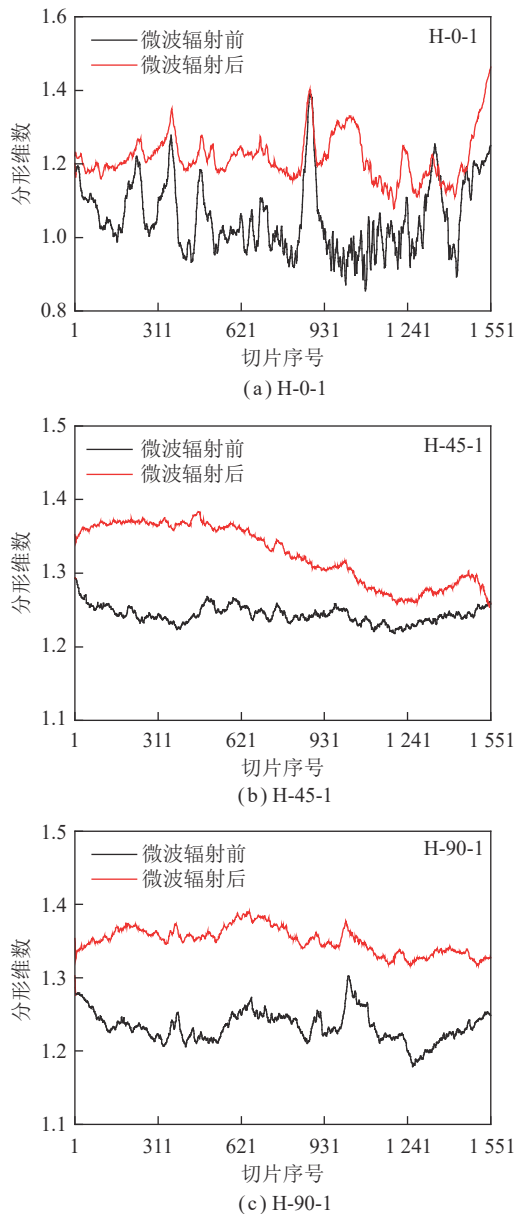


图 10 微波辐射前后煤体二维 CT 扫描图像分形维数

Fig.10 Fractal dimension of two-dimensional CT scan images of coal before and after microwave irradiation

裂隙分别提取,其等效裂隙体积分布结果如图 11 所示。为了实现对裂隙发育的精准量化表征,根据煤样的等效裂隙体积分布规律可将裂隙分为 3 种类型: A 型——等效裂隙体积 $V \leq 0.2$; B 型—— $0.2 < V \leq 1$; C 型—— $V > 1$ 。

0°煤样内部原生裂隙大都沿水平方向即层理方向分布,裂隙连通性差且孔径较小,在煤样中部甚至出现“断层”现象,使得煤样没有轴向连通的裂隙。在微波辐射后,裂隙相互连通,在煤样的中部产生了较多的新生裂隙(如图 12(a)红色框选区),而且出现了至上而下的连通性裂隙,能够极大满足该煤样轴向气体渗流的需求。

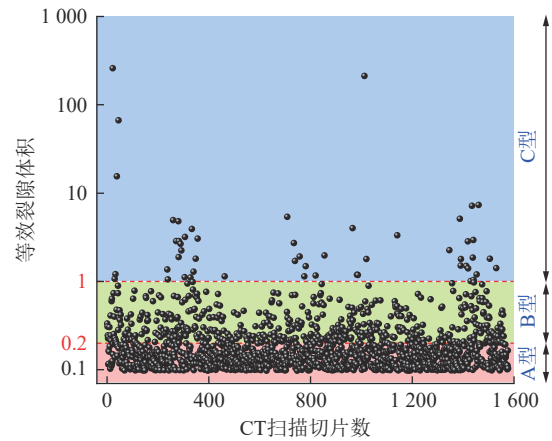


图 11 裂隙等效体积分类方法

Fig.11 Fracture equivalent volume classification method

等效体积比是不同类型裂隙体积占总体积的份额。微波辐射后,0°煤样中体积较小的 A、B 型裂隙占比分别由 14.2%、17.72% 降低到 4.03% 与 4.75%,而体积较大的 C 型裂隙从 68.08% 增长到 91.22%,这是由于 A、B 型裂隙在微波辐射的过程中受微波热应力的影响相互连通,进而转化为体积更大的 C 型裂隙。

在 45°煤样中能清楚辨析面割理与端割理的赋存形态,原生裂隙均匀分布,具有轴向连通裂隙,其中 C 型裂隙是构成连通裂隙的主体。微波辐射后煤样中裂隙数量明显增多,主要集中在切片数为 1~775 的轴心位置(对应煤样的中上部),但也存在原有裂隙歼灭或减少的现象(如图 12(b)黄色框选区)。微波辐射下原有裂隙面的延展性得到提升,新生的裂隙面多为沿层理方向,少数沿端割理方向的裂隙将相邻的平行裂隙相互连通(如图 12(b)红色框选区),增强了裂隙面之间的连通性。此外发现 45°煤样边缘位置的致裂效果低于煤样内部;分析原因一方面是由于煤样边缘热交换速率快,不利于高温积聚,另一方面是由于煤样边缘位置卸压程度高,卸压孔隙会使矿物颗粒间隙过大,无法转换成有效的热应力,从而难以对煤样边缘位置产生较大的损伤作用。

由于 45°原始煤样中存在连通裂隙,使得在微波辐射前该煤样的 C 型裂隙占比很大,达到 94.18%。在微波辐射后,体积较小的 A 型和 B 型裂隙在微波辐射后与相邻的 C 型裂隙相互连通(如图 12(b)白色框选区),使之形成体积更大的 C 型裂隙,同时原连通裂隙进一步扩展,使得 C 型裂隙占比进一步提高至 97.81%,这将为气体的渗流提供良好的运移通道。

由图 12(c)所示,90°煤样中的原生裂隙面呈“井”字分布,端割理与面割理垂直相交,煤体中发育有 4 条轴向延伸的裂隙面,与二维 CT 扫描图像判断的裂

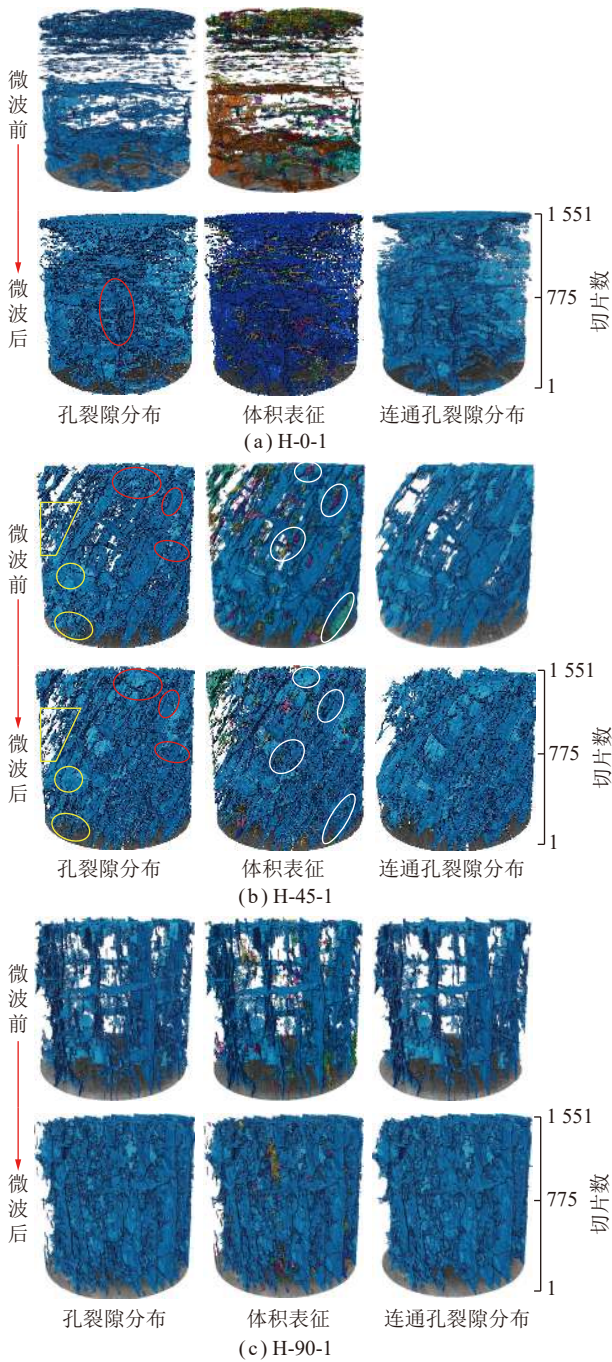


图 12 微波辐射下煤样三维裂隙演化规律

Fig.12 3D fracture evolution law of coal samples under microwave irradiation

隙走向一致。微波辐射后煤体中沿层理的裂隙由原始的 4 条均匀增加到 7 条,而垂直于层理方向的裂隙没有明显增长,不过在 2 个轴向裂隙面之间形成了密集的海绵状裂缝网,可见裂隙面之间的煤基质发生了整体性的损伤。这是由于裂隙面的存在,裂缝发育到裂隙面后将停止扩展,而热应力将继续在这个区域产生新的裂隙,重复此破坏路径,所以在裂隙面之间形成的不是片状的裂隙,而是密集的海绵状裂缝网。

90°煤样在微波辐射后的 C 型裂隙占比达到最大,

达 98.24%,其连通裂隙体积更大。此外由于原生裂隙与层理面结构的空空间关系,使得微波辐射后裂隙的扩展与新生裂隙方向对于煤体轴向渗流都是优势方向,据此可以判断微波辐射后 90°煤样的渗透率会得到大幅提高。

裂隙度可以用来表征煤岩内部裂隙分布与形态特征^[41],利用 CT 扫描切片阈值分割后所有孔裂隙的总和与煤样体积之比求得微波辐射前后不同层理方向煤样总裂隙度,如图 13 所示。可见微波辐射前 0°煤样的总裂隙度最低,45°煤样的原始总裂隙度最高,这是由于 45°煤样的力学稳定性最差^[42],在煤样制备过程中不可避免地受外界干扰产生的孔裂隙。在微波辐射后,3 种层理方向煤样的裂隙度都有增长的趋势;但对于 90°煤样其增长率最高,达到 87.36%,可见 90°煤样在微波辐射后裂隙的增长效率最优。

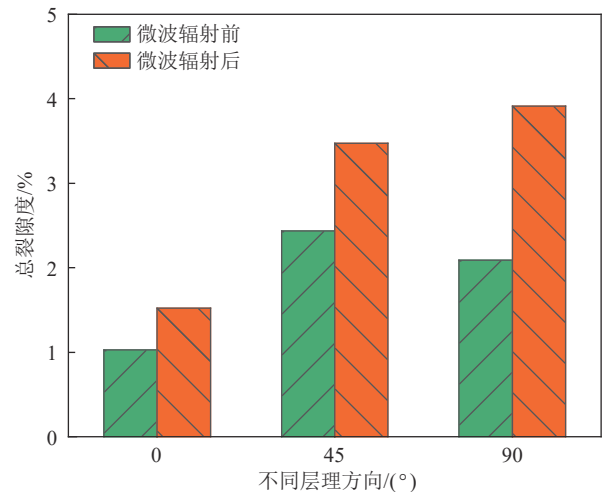


图 13 微波辐射前后不同层理方向煤样 CT 总裂隙度

Fig.13 CT total fracture rate of coal with different bedding directions before and after microwave irradiation

4 微波辐射下不同层理方向煤体的增渗规律及作用机制

4.1 微波辐射下不同层理方向煤体渗流规律

本文采用稳态渗流法对微波辐射前、后煤样渗透率进行了测试,考虑到同一层理方向的不同煤样渗透率大小存在天然差异的情况,对同组试验数据进行了均化处理,结果如图 14 所示。

由图 14 可知,原煤样渗透率表现为随进气压力增加而先轻微减小、后增大(H-60-1 除外),呈现典型的 Klinkenberg 效应^[43],其中 90°煤样的气体 Klinkenberg 效应最为明显,0°煤样最弱。另外,随着层理面与加载方向之间的夹角减小,原煤样渗透率呈现先增大、后降低再增大的变化趋势,其渗透率应力

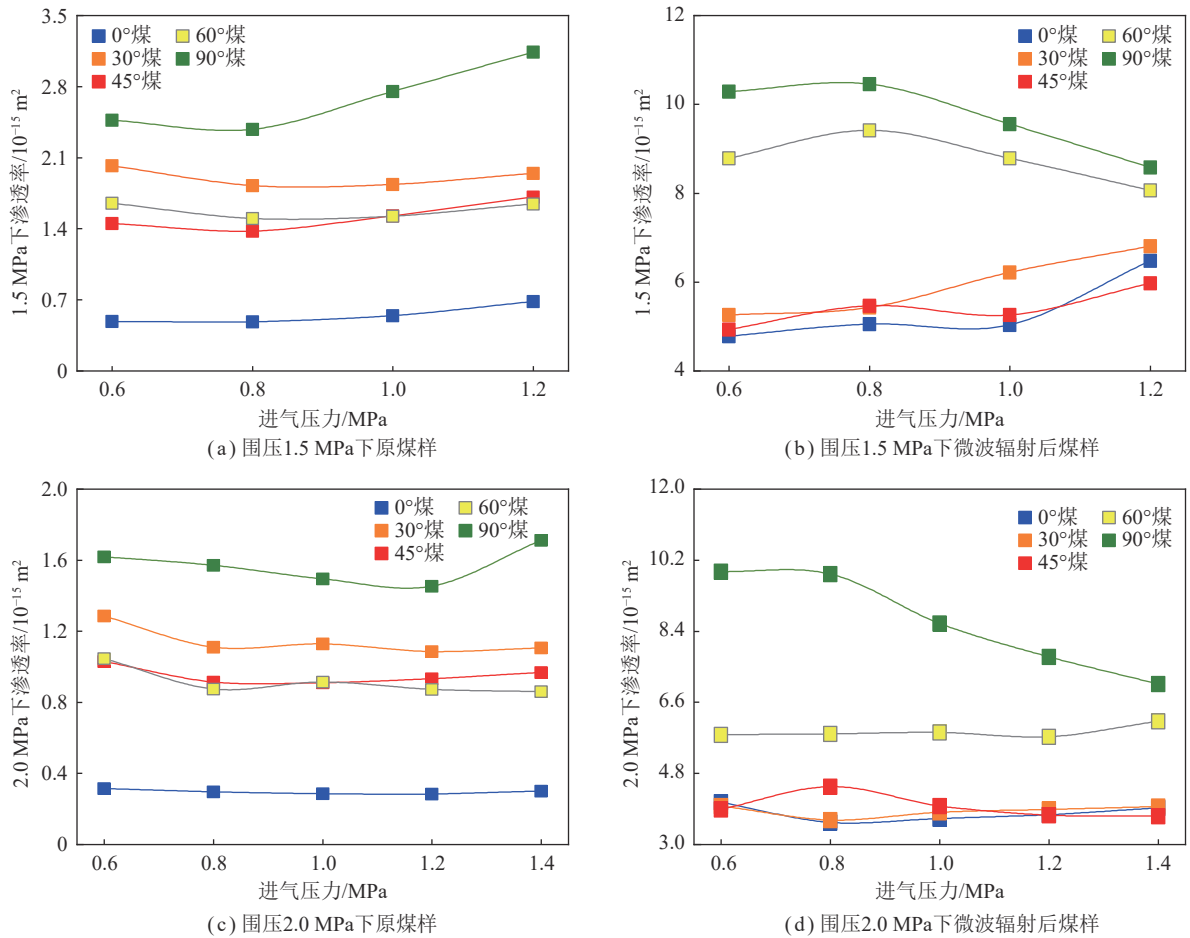


图 14 微波辐射前后不同层理方向煤样渗透率变化

Fig.14 Permeability of coal with different bedding directions before and after microwave irradiation

敏感性越强,这与已有研究^[44]吻合。而且,原煤样渗透率曲线彼此几乎平行变化,分层明显,总体为渗透率 $K(90^\circ) > K(30^\circ) > K(45^\circ) > K(60^\circ) > K(0^\circ)$ 。

在微波辐射后,不同层理方向煤样的渗透率曲线变化规律较原煤样发生了变化。首先,围压为 1.5 MPa 下的 0°、45°、60°、90°煤样和围压为 2.0 MPa 下的 45°、90°煤样的渗透率曲线部分区段会有随进气压力的增大而降低的现象,这是由于在微波辐射后,煤样内部产生了大量的损伤孔裂隙,渗透率测试所施加的轴围压使得煤体基质不断收缩压密,减少的渗流通道使得气测渗透率有所下降;轴围压越大,此现象越不明显。

此外,不同层理方向煤样在微波辐射后的渗透率均有所增长,渗透率增长比是微波辐射后煤样渗透率增长量与原始渗透率的比值,结果如图 15 所示。渗透率平均增长比随煤样层理方向的增大表现为先急剧减小、后缓慢增大、再逐渐减小的趋势,其增长比分别为 10.46、2.26、2.91、5.05、3.71,为不同层理方向煤层微波破煤增透效果评价提供了可靠依据。其中 0°煤样的渗透率平均增长比最高,达 10.46,这使得 0°煤样在微波辐射后的渗透率与 30°和 45°煤相近,可以表

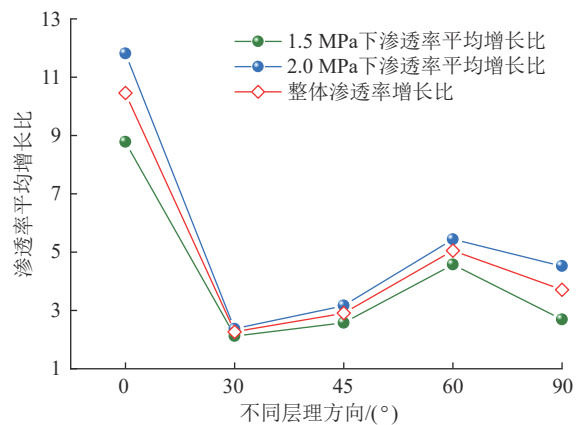


图 15 微波辐射前后不同层理方向煤体渗透率变化

Fig.15 Permeability change of coal with different bedding directions before and after microwave irradiation

明微波辐射对 0°煤样的增渗效果最优;但由于原始煤样中层理方向大的煤样其渗透率基数较层理方向小的煤样大许多,使得微波辐射后层理方向大的煤样的渗透率依然较大。由此可见,与原煤样相比,微波辐射后不同层理方向煤样渗透率之间的数量级差异更小,有效减弱了不同层理方向煤体之间的渗透率各向

异性。因此,在微波破煤增透工程实践中,应结合实际的煤层层理构造特征及其在微波破煤后的增渗规律,从而实现微波破煤增透技术方案的优化设计。

4.2 层理对微波破煤增透效果的影响机制

煤作为一种典型的电阻型损耗介质,煤基质中含有高岭土、黄铁矿等矿物质^[32],而层理则由腐植质等松散介质充填,两者的介电损耗与传热性质相差较大,

这使得微波辐射下煤基质与层理面位置的升温速率不同,从而在层理面与煤基质之间形成明显的温度梯度,进而产生热应力,使得煤体发生热破裂。通过对微波辐射过程中的煤样进行红外热成像(图 16),可以发现微波辐射后煤样中高温区的长轴方向整体沿层理方向分布,并在高温区产生与之对应的裂隙,表明微波辐射对煤样的热效应受层理的赋存形态影响。

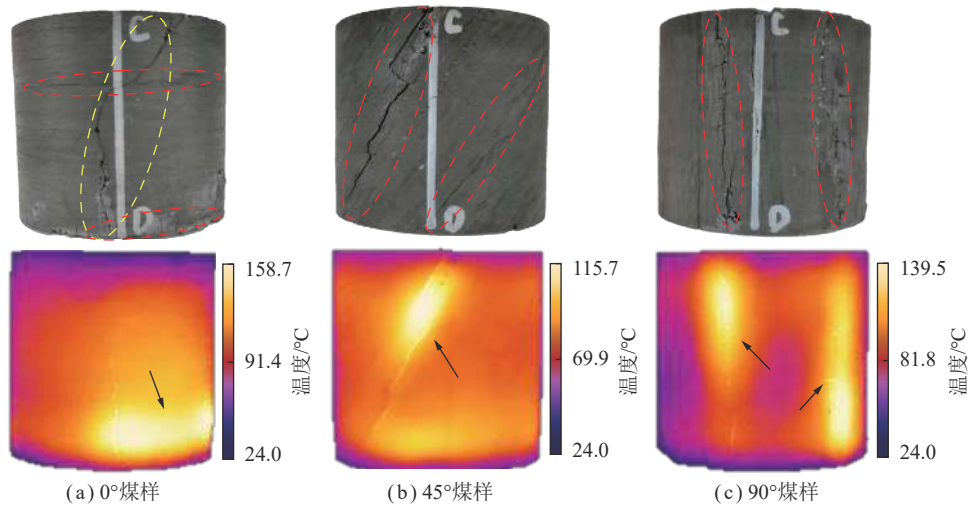


图 16 微波辐射后不同层理方向煤体的温度分布

Fig.16 Distribution of temperature in coal with different bedding directions after microwave irradiation

当煤样层理面平行于应力加载方向时,在轴向载荷压缩和层理面附近高温区产生的热应力的共同作用下,煤样会在层理面与煤基质之间产生沿侧向的拉应力(图 17(a)),使得煤样在层理面延展处产生张拉破坏,表现为图 16(c)红色框选区中的沿层裂隙。其次,当层理面与应力加载方向垂直时,煤样高温区产生的轴向热应力会受到轴向载荷的约束,使其在沿层理方向的裂隙扩展程度较小;然而,随着微波能量的持续馈入,煤样膨胀变形会向无约束的侧向发展,使煤体破坏并形成斜交层理面的“撕开型”裂缝,如图 16(a)中的黄色框选区。然而,当层理面与应力加载方向斜交时,在轴向载荷与微波热应力的共同作用下,高温

区煤体会沿层理方向发生剪切滑移破坏,形成如图 16(b)红色框选区中的沿层裂隙。由此可见,微波辐射下煤样层理面与外部应力加载方向之间夹角不同时,煤样的损伤形式也不尽相同,微波破煤表现出显著的层理效应。

5 结 论

(1) 煤层层理对微波破煤的影响显著。层理面与应力加载方向之间夹角越大,微波辐射下煤体的束缚孔减少幅度与连通性裂隙体积的增长幅度越大,其中层理方向为 0°的煤样束缚孔减少幅度最大,达 61%。

(2) 微波辐射下煤体中微观裂隙发育具有显著的层理效应。煤体微观裂隙演化过程为:扩展原生沿层理面裂隙→萌生新的沿层理面裂隙→扩展与层理面相交的裂隙。

(3) 与原煤样相比,微波辐射后不同层理方向煤样渗透率之间的数量级差异更小。其中,层理方向为 0°煤样的渗透率平均增长比为 10.46,增渗效果最优;而且,微波辐射后 0°煤样的渗透率与 30°和 45°煤样相近,有效减弱了不同层理方向煤样的渗透率各向异性。

(4) 煤层层理对微波破煤增透的影响机制在于煤基质与层理面的介电损耗与传热特性差异,造成 2 者之间形成显著的温度梯度,使得微波对煤体的热应力

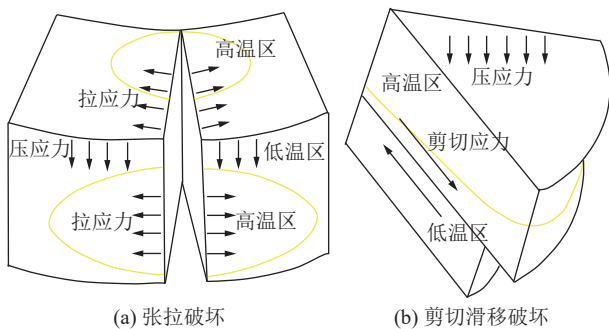


图 17 微波辐射下不同层理方向煤体破坏形式

Fig.17 Cracking modes of coal with different bedding directions under microwave irradiation

分布受制于层理结构;当层理面与加载方向垂直或平行时,煤体以张拉破坏为主;而当层理面与加载方向斜交时,煤体以剪切滑移破坏为主。

参考文献(References):

- [1] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1–15.
XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1–15.
- [2] 王兆丰, 刘军. 我国煤矿瓦斯抽放存在的问题及对策探讨[J]. 煤矿安全, 2005, 36(3): 29–32, 44.
WANG Zhaofeng, LIU Jun. Problems existing in methane drainage in coal mines of China and probing into the countermeasures[J]. Safety In Coal Mines, 2005, 36(3): 29–32, 44.
- [3] 胡国忠, 黄兴, 许家林, 等. 可控微波场对煤体的孔隙结构及瓦斯吸附特性的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S2): 374–379.
HU Guozhong, HUANG Xing, XU Jialin, et al. Effect of microwave field on pore structure and absorption of methane in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 374–379.
- [4] YANG N, HU G, ZHU J, et al. Evolution of pore-fracture structure and permeability of coal by microwave irradiation under uniaxial compression[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 107: 104759.
- [5] 李贺. 微波辐射下煤体热力响应及其流-固耦合机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
LI He. Thermodynamical response of coal and the hydraulic-mechanical coupling mechanism under microwave irradiation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [6] 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): 480–484, 492.
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): 480–484, 492.
- [7] HUANG J, XU G, LIANG Y, et al. Improving coal permeability using microwave heating technology—A review[J]. Fuel, 2020, 266: 117022.
- [8] FU X, LUN Z, ZHAO C, et al. Influences of controlled microwave field irradiation on physicochemical property and methane adsorption and desorption capability of coals: Implications for coalbed methane (CBM) production[J]. Fuel, 2021, 301: 121022.
- [9] HONG Y D, LIN B Q, ZHU C J, et al. Image and ultrasonic analysis-based investigation of coal core fracturing by microwave energy[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 127: 104232.
- [10] 胡国忠, 王春博, 许家林, 等. 微波辐射降低硬煤冲击倾向性试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 450–465.
HU Guozhong, WANG Chunbo, XU Jialin, et al. Experimental investigation on decreasing burst tendency of hard coal using microwave irradiation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 450–465.
- [11] LI H, SHI S, LIN B, et al. Effects of microwave-assisted pyrolysis on the microstructure of bituminous coals[J]. Energy, 2019, 187: 115986.
- [12] YANG N, HU G, QIN W, et al. Experimental study on mineral variation in coal under microwave irradiation and its influence on coal microstructure[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 96: 104303.
- [13] LIN B, CAO X, LIU T, et al. Experimental research on water migration-damage characteristics of lignite under microwave heating[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(2): 1058–1069.
- [14] 杨新乐, 任常在, 张永利, 等. 低渗透煤层气注热开采热-流-固耦合数学模型及数值模拟[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 1044–1049.
YANG Xinle, REN Changzai, ZHANG Yongli, et al. Numerical simulation of the coupled thermal-fluid-solid mathematical models during extracting methane in low-permeability coal bed by heat injection[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 1044–1049.
- [15] 管伟明, 张紫昭. 微波加热煤岩裂隙变形的电-热-固耦合模型[J]. 中国矿业, 2015, 24(7): 133–136.
GUAN Weiming, ZHANG Zizhao. Numerical simulate for crack deformation of coal in microwave heated[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(7): 133–136.
- [16] ZHAO Y, GAO Y, SUN Z, et al. Dielectric anisotropy effects on the microwave-induced thermodynamic response of coal: Numerical simulations and experiments[J]. Fuel, 2022, 326: 125038.
- [17] PENG Z, HWANG J Y, KIM B G, et al. Microwave absorption capability of high volatile bituminous coal during pyrolysis[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(8): 5146–5151.
- [18] 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(S2): 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.
- [19] HUANG J, HU G, XU G, et al. The development of microstructure of coal by microwave irradiation stimulation[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 66: 86–95.
- [20] LAN W, WANG H, LIU Q, et al. Investigation on the microwave heating technology for coalbed methane recovery[J]. Energy, 2021, 237: 121450.
- [21] HONG Y D, LIN B Q, ZHU C J, et al. Temperature rising characteristic of coal powder during microwave heating[J]. Fuel, 2021, 294: 120495.
- [22] HU G Z, YANG N, XU G, et al. Experimental investigation on variation of physical properties of coal samples subjected to microwave irradiation[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 150: 118–125.
- [23] LIU C, YIN G, LI M, et al. Deformation and permeability evolution of coals considering the effect of beddings[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 117: 49–62.
- [24] 王登科, 吕瑞环, 彭明, 等. 含瓦斯煤渗透率各向异性研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1008–1015.
WANG Dengke, LÜ Ruihuan, PENG Ming, et al. Experimental study on anisotropic permeability rule of coal bearing methane[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1008–1015.

- [25] 陈宇龙, 张宇宁, 唐建新, 等. 煤层层理效应对甲烷吸附-解吸及渗流规律影响的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 859-868.
CHEN Yulong, ZHANG Yuning, TANG Jianxin, et al. Experimental study of the influence of bedding effect on methane adsorption-desorption and seepage[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 859-868.
- [26] 邓博知, 康向涛, 李星, 等. 不同层理方向对原煤变形及渗流特性的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 888-894.
DENG Bozhi, KANG Xiangtao, LI Xing, et al. Effect of different bedding directions on coal deformation and permeability characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 888-894.
- [27] 张超谟, 陈振标, 张占松, 等. 基于核磁共振 T_2 谱分布的储层岩石孔隙分形结构研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(4): 80-86, 166-167.
ZHANG Chaomo, CHEN Zhenbiao, ZHANG Zhansong, et al. Fractal characteristics of reservoir rock pore structure based on NMR T_2 distribution[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(4): 80-86, 166-167.
- [28] 张昌达, 潘玉玲. 关于地面核磁共振方法资料岩石物理解释的一些见解[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(1): 1-8.
ZHANG Changda, PAN Yuling. Some views on petrophysical interpretation of SNMR data[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2006, 3(1): 1-8.
- [29] 姚艳斌, 刘大猛, 蔡益栋, 等. 基于 NMR 和 X-CT 的煤的孔隙结构精细定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(11): 1598-1607.
YAO Yanbin, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. Fine quantitative characterization of coal pores and fissures based on NMR and X-CT[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2010, 40(11): 1598-1607.
- [30] CAI Y, LIU D, PAN Z, et al. Petrophysical characterization of Chinese coal cores with heat treatment by nuclear magnetic resonance[J]. Fuel, 2013, 108: 292-302.
- [31] 翟成, 孙勇, 范宜仁, 等. 低场核磁共振技术在煤孔隙结构精准表征中的应用与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 828-848.
ZHAI Cheng, SUN Yong, FAN Yiren, et al. Application and prospect of low-field nuclear magnetic resonance technology in accurate characterization of coal pore structure[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 828-848.
- [32] 李贺, 林柏泉, 洪溢都, 等. 微波辐射下煤体孔隙结构演化特性[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.
- [33] YAO Y, LIU D, CHE Y, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR)[J]. Fuel, 2010, 89(7): 1371-1380.
- [34] 黄兴. 微波场作用对煤的瓦斯吸附解吸特性影响的实验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
HUANG Xing. Experimental study on the effect of microwave field action on the characteristics of gas adsorption and desorption coal [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [35] 肖亮, 肖忠祥. 核磁共振测井 $T_{2\text{cutoff}}$ 确定方法及适用性分析[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 167-172.
XIAO Liang, XIAO Zhongxiang. Analysis of methods for determining NMR $T_{2\text{cutoff}}$ and Its Applicability[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1): 167-172.
- [36] 王乐平, 张国华, 王现强. 煤层气的储层特征及其对煤层气解吸的影响[J]. 煤炭技术, 2009, 28(1): 156-158.
WANG Leping, ZHANG Guohua, WANG Xianqiang. Analysis of reservoir characteristic and affection to desorption of coalbed methane[J]. Coal Technology, 2009, 28(1): 156-158.
- [37] 王登科, 张平, 浦海, 等. 温度冲击下煤体裂隙结构演化的显微 CT 实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2243-2252.
WANG Dengke, ZHANG Ping, PU Hai, et al. Experimental research on cracking process of coal under temperature variation with industrial micro-CT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(10): 2243-2252.
- [38] 赵彦博. 准东煤微波热解特性的初步实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHAO Yanbo. Preliminary experimental research on microwave pyrolysis of Zhundong coal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [39] VASSILEV S, VASSILEVA C, BAXTER D, et al. Relationships between chemical and mineral composition of coal and their potential applications as genetic indicators. Part 1. Chemical characteristics[J]. Geologica Balcanica, 2010, 39(3): 21-41.
- [40] 付裕, 陈新, 冯中亮. 基于 CT 扫描的煤岩裂隙特征及其对破坏形态的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 568-578.
FU Yu, CHEN Xin, FENG Zhongliang. Characteristics of coal-rock fractures based on CT scanning and its influence on failure modes[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 568-578.
- [41] 王勇, 孟巧荣, 高力, 等. 热解无烟煤微细观孔隙结构随温度的演化规律[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 300-307.
WANG Yong, MENG Qiaorong, GAO Li, et al. Evolution law of micro-meso pore-fracture structure of anthracite in pyrolysis[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 300-307.
- [42] 龚爽, 赵毅鑫, 王震, 等. 层理对煤岩动态裂纹扩展分形特征的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2574-2582.
GONG Shuang, ZHAO Yixin, WANG Zhen, et al. Effect of bedding on the fractal characteristics of dynamic crack propagation in coal rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2574-2582.
- [43] KLINKENBERG, L J. The permeability of porous media to liquids and gases[J]. Drilling and Production Practice, 1941: 200-213.
- [44] ZHANG Cun, ZHANG Lei, ZHAO Yixin, et al. Experimental study of stress-permeability behavior of single persistent fractured coal samples in the fractured zone[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15(5): 2159-2170.