

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

徐吉钊^{1,2}, 翟 成^{1,2}, 桑树勋^{3,4}, 孙 勇^{1,2}, 丛钰洲^{1,2}, 郑仰峰^{1,2}, 唐 伟^{1,2}

(1. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 煤层气成藏与地质过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 煤层低孔渗特征成为制约瓦斯高效率抽采的主要瓶颈, 现多采用强化致裂增透技术来改造煤储层孔隙结构, 旨在提高煤体渗透率。液态 CO₂ 循环致裂能够通过循环热应力、相变致裂及疲劳损伤的耦合效应协同致裂煤体, 可联合低场核磁共振技术实现煤体孔裂隙结构的定量表征, 而基于核磁共振技术对液态 CO₂ 循环作用煤体孔隙的几何特征演化规律研究较少。基于自主研发的液态 CO₂ 循环致裂试验平台, 对多个褐煤试样进行循环冲击作用, 采用低场核磁共振技术对循环作用煤体的孔裂隙结构进行统计监测, 并结合几何分形理论探讨了渗流孔分形维数 D_s 、有效贯通孔分形维数 D_e 、 T_2 截止值、孔隙率、渗透率的耦合关系。统计分析液态 CO₂ 循环作用后煤体端面不同裂隙形态的差异性与基质非均质性、原始孔裂隙结构的相互关系; “饱水-离心” 联测法获得的 T_2 弛豫谱曲线表征液态 CO₂ 循环作用煤体的总孔隙率 φ_t 、有效孔隙率 φ_e 、核磁渗透率 k_{SDR-d} 及其增长率 Δk_{SDR-d} 均有所增加, 利用基于 T_2 谱构建的几何分形计算模型, 论证了渗流孔和有效贯通孔具有较好的分形特征, 而吸附孔不具备分形特征。 D_s 与 T_2 截止值存在“快速增大—缓慢增大”的指数拟合关系, 分别与 φ_t 、 φ_e 、 k_{SDR-d} 和 Δk_{SDR-d} 存在负相关关系, 而 D_e 分别与 φ_e 和 Δk_{SDR-d} 呈正相关, 揭示了液态 CO₂ 循环作用能够促进煤基质内多尺度孔裂隙结构的扩容及延伸, 裂隙间的贯通率和渗透特性大幅提升。

关键词: 液态 CO₂ 循环致裂; 核磁共振技术; 裂隙; 分形维数; 瓦斯抽采

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2021)11-3578-12

Pore evolution of coals affected by cyclical liquid CO₂ fracturing based on the low-field nuclear magnetic resonances

XU Jizhao^{1,2}, ZHAI Cheng^{1,2}, SANG Shuxun^{3,4}, SUN Yong^{1,2}, CONG Yuzhou^{1,2},
ZHENG Yangfeng^{1,2}, TANG Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Resource and Earth Sciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process of the Ministry of Education, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The low porosity and permeability of coals have been the main bottleneck restricting the efficient gas extraction. Nowadays, the pore structure of coal reservoirs is mostly reformed by the fracturing and anti-reflection technology.

收稿日期: 2020-10-28 修回日期: 2021-01-27 责任编辑: 郭晓伟 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1701

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51925404); 国家自然科学基金面上资助项目(51774278)

作者简介: 徐吉钊(1992—), 男, 山东单县人, 讲师, 博士。E-mail: jizhao_xu@cumt.edu.cn

通讯作者: 翟 成(1978—), 男, 山东滕州人, 教授, 博士。E-mail: greatzc@126.com

引用格式: 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): 3578-3589.

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): 3578-3589.



移动阅读

gy to improve permeability. The liquid CO₂ cyclical fracturing can synergistically destroy the coals by the coupling effect of thermal cycling, phase change fracturing and fatigue damage, and the low-field nuclear magnetic resonance technology can be used to achieve a quantitative characterization of pore-crack structure of coals. However, few studies focus on the evolution law of pore geometric characteristics of liquid CO₂ affected coals based on the nuclear magnetic resonances. Based on the liquid CO₂ cyclical test platform dependently developed, the lignite specimens are affected by multiple liquid CO₂ impacts, and the pore change are recorded by nuclear magnetic relaxation technology. The fractal geometry theory is adopted to explore the relationships among the seepage pore fractal dimension D_s , the effective pore fractal dimension D_e , the T_2 cutoff value, porosity, and permeability. The relationships among the crack morphology difference, the matrix heterogeneity and original pore structure of affected coals by liquid CO₂ are statistically analyzed. The T_2 spectra obtained by the “saturation-centrifuge” method indicates that total porosity φ_t , effective porosity φ_e , nuclear magnetic permeability $k_{\text{SDR-d}}$ and its increase rate $\Delta k_{\text{SDR-d}}$ all increase. Geometry fractal calculation model is built based on the T_2 spectrum, demonstrating that the seepage pores and the effective connected pores have better fractal characteristics and the adsorbed pores do not have fractal characteristics. D_s and T_2 cutoff values have an exponential fitting relationship with “rapid increase-slow increase”, and have negative relationships with φ_t , φ_e , $k_{\text{SDR-d}}$ and $\Delta k_{\text{SDR-d}}$, respectively. D_e positively correlates with φ_e and $\Delta k_{\text{SDR-d}}$, respectively. These reveal the fact that the liquid CO₂ cyclical impact could enhance multi-scale pore expansion and crack extension, and the crack penetration and permeability of coals substantially increase. This method could provide some basic supports for the quantitative evaluation of pore structure under the effect of liquid CO₂ cyclical fracturing in the field application.

Key words: cyclic liquid CO₂ fracturing; nuclear magnetic resonance technology; cracks; fractal dimension; gas extraction

瓦斯高效智能抽采是有效防治煤层瓦斯突出、保障煤矿安全开采的重要举措,而煤层高瓦斯含量、低孔渗性及复杂地质结构往往成为制约煤矿集约化开采的主要影响因素^[1-3]。作为一低温惰性压裂液, BULLEN 和 LILLIES^[4] 提出利用纯 100% 液态 CO₂ 流体代替压力水致裂煤层来提高气体产量,可极大地减少水资源的消耗量。美国圣胡安盆地于 1995—2001 年期间开展了大规模的液态 CO₂ 注入煤层工程试验,其中约 3.36×10^5 t 的 CO₂ 介质注入 4 口井内,提高了气体抽采效率^[5]。2010 年沁水盆地的 SX-001 井注入 CO₂ 试验结果表明,注入后的产气率是注入前的 2.45 倍^[6]。

基于损伤力学和空气动力学,周西华等^[7] 研究了液态 CO₂ 爆破原理及最优钻孔布置参数,通过 FLAC^{3D} 数值软件,证实了液态 CO₂ 爆破技术能够有效致裂煤层结构。张东明等^[8-9] 提出了低渗煤层液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术,理论分析液态 CO₂ 相变射孔破岩力学机理及地应力条件下裂隙扩展力学机理,借助 PFC^{2D} 分析了不同地应力和射流压力下液态 CO₂ 相变射孔破岩及裂隙分布特征。文虎等^[10-11] 指出,液态 CO₂ 瞬时低温作用可造成煤体水分相变成冰并促进裂隙扩展延伸,结合 CT 扫描技术

研究发现液态 CO₂ 冻融作用可促进煤体内部产生显著的新生裂隙。ROY 等^[12] 通过数值模拟发现液态 CO₂ 循环注入(冷冻)和闭井(升温)过程所产生的循环热应力可造成钻孔周边径向裂隙的发育。翟成等^[13] 研究了煤层层理方向对液态 CO₂ 致裂煤体各向异性的影响,借助核磁共振和超声波仪实现了低温作用前后煤体的声波波速、多尺度孔隙结构演化等的定量表征。XU Jizhao 等^[14-15] 利用核磁弛豫分析技术统计分析了液态 CO₂ 循环作用前后煤体基质内孔裂隙结构的演化规律,揭示了循环作用参量与孔隙特征参量的耦合关系,验证了液态 CO₂ 循环作用致裂煤体的有效性。

作为一种对含氢流体敏感的孔隙测试方法,核磁共振技术能够实现多孔介质孔隙度、渗透率、储层流体等相关信息的定量化表征^[16-17]。CAI Yidong 等^[18] 通过饱水-离心联测方法得到煤样的有效孔隙率及 T_2 截止值,实现煤体孔径结构的分布重构。YAO Yanbin 等^[19] 通过对比 CT 扫描法、恒速压汞法与核磁共振 3 种测试手段下的煤体孔径分布,发现核磁共振在无损评价煤体孔径分布具有一定的优势。ZHAI Cheng 等^[20] 基于 T_2 弛豫谱将自由水空间-束缚水空间占比、总孔-吸附孔-渗流孔占比等参数演化特征耦合循环作用参量,完善了煤体跨尺度孔裂隙结

构的表征方法。基于核磁弛豫特征参数,相关煤体渗透率计算模型被大量提出,常见的计算模型主要有SDR模型^[21]、T-C模型^[22]、PP模型^[23]及基于回归分析的SDR改进模型和T-C改进模型^[24]。

谢和平和鞠杨^[25]指出,几何分形能够用来定量描述多尺度孔裂隙结构的分布复杂性。ZHOU Sandong等^[26]采用核磁共振技术量化煤体孔裂隙分形维数及其对有效孔隙度和渗透率的影响,论证了核磁共振分形方法能够较好地反应煤体孔裂隙的非均质性,显著影响渗流空间占比。张全培等^[27]基于核磁弛豫数据和分形理论研究了超低渗储层岩心的分形特征,认为 $T_2 < T_{2\text{cutoff}}$ 段孔吼分布不具有分形特征, $T_2 > T_{2\text{cutoff}}$ 段可动流体孔隙空间具有分形特征,分形维数值可反映相互连通孔隙的复杂程度($T_{2\text{cutoff}}$ 为 T_2 截止值)。杨赫等^[28]基于核磁共振实验测试了不同围压和水压作用下煤体孔隙结构特征,采用分形几何理论分析了煤体有效渗流通道结构的分形特征。梁志凯等^[29]综合分形维数理论,探讨了核磁共振分形维数与矿物组成、地球化学参数、物性参数之间的相互关系,认为基于核磁弛豫的孔隙几何分形能够作为衡量岩石物性和评价储层质量的重要指标。

针对液态CO₂循环作用煤体多尺度孔裂隙结构

的变化表征,现有研究大多局限于尺寸效应和孔隙宏观特征参数的研究,而基于核磁弛豫特征的CO₂作用煤体的孔隙分形特征演化规律研究较少。笔者基于自主研发的液态CO₂循环致裂试验平台和NMR测试手段,对不同循环参量的液态CO₂作用后煤体的孔隙几何特征演化规律进行实时在线测试,为揭示液态CO₂循环作用煤体的致裂机制及构建孔隙几何表征方法提供一定的科研依据。

1 实验设备及流程

本课题组自主研发了液态CO₂循环致裂试验平台,如图1所示,主要由高压低温液态CO₂反应系统单元和外部升温系统单元2个部分组成。前者主要由制冷机组、CO₂恒速恒压泵、高压釜体、CO₂气瓶、空气压缩机及数据采集器组成,能够通过水循环降温方式利用CO₂恒速恒压泵将CO₂注入高压釜内并作用于煤体,模拟液态CO₂注入煤体时的冷冲击过程。后者通过加热的方式对液态CO₂冷冲击煤体进行升温,模拟闷井过程中煤层环境与作用后煤体的热传导过程^[30]。其中,“冷冲击—加热升温”过程为一个液态CO₂作用循环次数,冷冲击时间 t_1 和加热时间 t_2 之和为一个液态CO₂作用循环时间(t_1+t_2 ,其中 $t_1=t_2$)。

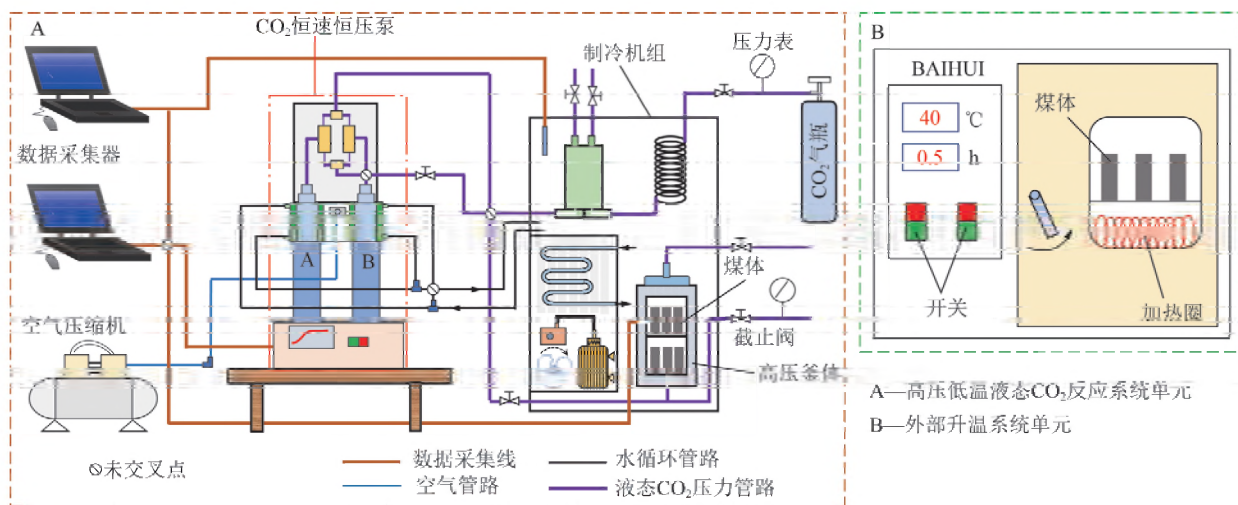


图1 液态CO₂循环致裂试验平台示意^[30]

Fig. 1 Image of liquid CO₂ cyclical fracturing experimental system^[30]

利用低场核磁共振仪(Mini MR-60,苏州纽迈)对液态CO₂作用前后饱水和离心煤体的 T_2 弛豫时间进行测试,根据Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)序列测试得到信号强度与弛豫时间的衰减曲线,通过数值反演获取不同尺寸孔隙的占比及孔渗性。孔径大小与 T_2 弛豫时间正相关,如式(1)所示。本次测试确定的测试参数分别为:接收机宽带 $S_w = 250$ kHz,重复采样等待时间 $T_w = 2\ 500$ ms,扫描次数 $N_s = 32$;

射频延时 $R_{FD} = 0.02$ ms,回波间隔 $T_E = 0.2$ ms;回波数 $N_{ECH} = 5\ 000$,测试信噪比 >25 。

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

式中, ρ 为横向弛豫强度; $\left(\frac{S}{V} \right)_{\text{pore}}$ 为煤岩孔隙比表面; S 为孔隙表面积; V 为孔隙体积; F_s 为孔隙形状因子; r 为孔隙半径。

煤样选自内蒙古胜利煤矿,为最大程度地减小各向异性的影响,钻取煤心要求来自同一煤块,且钻取过程中要求避开层理位置。煤心钻取尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱体,确保其始终置于核磁共振

样品载床的均匀磁场区域内来提高测试精度。加工好的煤心采用保鲜膜进行包裹并放在真空干燥箱内进行保存。钻取煤心的工业分析和显微组分参数见表 1。

表 1 煤心的工业分析和显微组分参数

Table 1 Proximate and maceral analysis of coal cores

%

工业分析				显微组分				$R_{o,max}$
M_{ad}	A_{ad}	V_{daf}	FC_{ad}	V	I	E	M	
11.37	14.63	53.41	20.59	79.5	15.5	3.6	1.4	0.32

本次试验选择 6 个参数近似的煤心,分别标记为 IM-1, IM-2, ..., IM-6, 对应的液态 CO₂ 作用循环时间分别为 10, 20, ..., 60 min, 且每一试样的作用循环次数分别为 0, 1, ..., 24, 25。试验开展流程如下:

(1) 将所有煤样进行真空干燥,直至连续 2 次称重的质量差比值低于 0.1% 为止,煤样质量记为 M_{dry} , i 为试样编号;将干燥煤样放入装满去离子水的真空饱水仪(-0.95 MPa)持续饱水 24 h,直至表面无明显气泡出现,饱水煤样质量记为 M_{sat} 。

(2) 核磁测试参量设置完毕后,将初始饱水煤样表面水分擦拭干净,并置于载床内进行测试,得到饱水状态时的初始 T_2 谱图;利用岩心离心机将饱水煤样进行离心 1 h,离心煤样质量记为 M_{icen} ;并借助核磁共振测试得到离心状态时的初始 T_2 谱图。

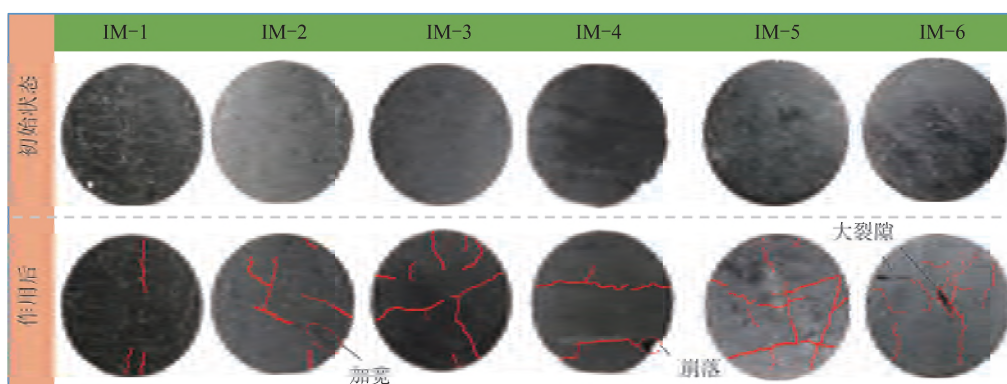
(3) 将离心煤样继续饱水,利用保鲜膜将饱水煤样进行包裹来消除 CO₂ 吸附对孔隙结构的影响。利用液态 CO₂ 流体预先对高压釜体进行降温处理,然后对釜体内的包裹煤体进行持续作用 t_1 时间,对冻结煤样进行加热升温持续作用 t_2 时间。

(4) 待液态 CO₂ 循环作用一次结束后,分别对煤样进行饱水和离心处理,其中,第 j 次循环次数作用后饱水煤体质量记为 M_{isatj} ;离心煤体质量记为 M_{icenj} ,重复步骤(2),(3),直至实验结束。

2 试验结果与讨论

2.1 煤样表观裂隙形态

通过对比液态 CO₂ 循环作用后同一煤样相同端面的裂隙分布可对裂隙演化复杂性进行定量表征,如图 2 所示。初始状态煤样端面较为平整,无明显的裂隙分布,液态 CO₂ 不同循环时间作用后煤样相同端面的裂隙分布存在较大的差异性。裂隙数量和形态复杂性分别与作用时间呈正相关关系,煤样 IM-1 出现 3 条独立的裂隙,但裂隙长度较短;煤样 IM-2 和 IM-3 端面分别产生少量的微裂纹,且 IM-2 原生裂隙宽度增大,部分新生裂隙与原生裂隙发生贯通,而煤样 IM-3 的裂隙形态呈分散式分布;煤样 IM-4 端面出现 2 条贯穿裂隙,并存在一处碎块崩落区;煤样 IM-5 和 IM-6 端面裂隙数量较多,分布更为复杂,且煤样 IM-6 表面出现 2 条较大的裂隙。

图 2 液态 CO₂ 循环作用前后煤体相同端面的裂隙分布演化Fig. 2 Crack evolution on the same end surface of coals under the pre-/post-affecting by liquid CO₂

裂隙分布差异性可能主要受煤体基质非均质性、原始孔隙结构、液态 CO₂ 循环作用条件等因素的影响,煤样非均质性较强、孔隙结构复杂、液态 CO₂ 循环作用次数和时间较多时,煤体内不同位置的变形响

应存在空间上的各向异性,弱强度区域内容易形成较大的张拉破坏并形成大量的微裂隙,液态 CO₂ 循环作用同时驱动微裂隙的扩展延伸,促进新生裂隙和原生裂隙之间的贯通,形成复杂的裂隙网络。

2.2 T_2 谱分析

以煤样 IM-2, IM-3, IM-6 为例,不同循环参量液态 CO_2 作用前后煤体的核磁特征变化特征如图 3 所示,其中, T_{CT} 为循环时间。饱水煤体的 T_2 谱呈现显著的“三峰”,较大 T_2 值对应较大孔隙孔隙,离心煤样的 T_2 谱普遍呈现“两峰”,表征大孔径孔隙内的自由水被离心出去。相比初始煤样而言,液态 CO_2 循环作用煤体在饱水条件下 T_2 谱幅值不断增加,曲线覆盖区间范围不断变宽,而离心条件下谱线幅值和有限区间宽度不断变小。饱水/离心煤样的核磁信号幅值差值与循环参量存在正相关关系,差值越大,表明

能够提供离子水浸入或离心的自由流动通道数量增加,煤基质内有效孔隙占比和渗透率相对提高。

液态 CO_2 循环接触煤体过程中,基质颗粒受到周期性的“冷冲击-加热升温”而发生不同程度的体积形变,具有不同热膨胀系数颗粒间的不均等变形容易在其粘结位置产生较大的张拉应力,且含有显著层理弱面结构的煤体颗粒易发生剪切滑移。颗粒的循环微观体积应变产生了大量的疲劳损伤,弱化基质黏聚力和抗破坏能力。在液态 CO_2 循环作用过程中的张拉与剪切破坏协同作用下,新生裂隙衍生及其与原生裂隙发生连通,实现煤体孔隙结构的“扩容”与“复杂化”。

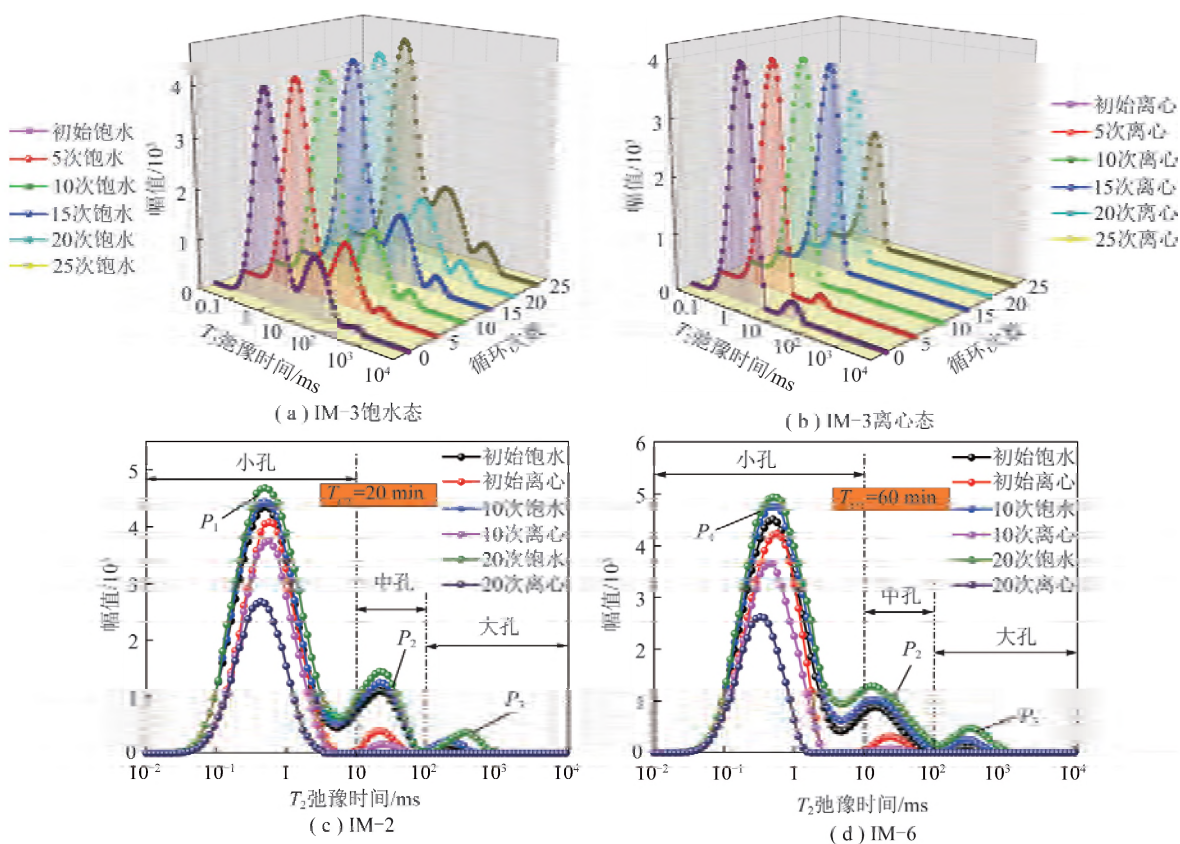


图 3 不同循环次数和不同循环时间液态 CO_2 作用前后煤样的 T_2 谱图

Fig. 3 T_2 spectra of pre-/post-affected coals under the impact of liquid CO_2 with different cycle number and cycle time

2.3 T_2 截止值及分维特征

T_2 截止值的确定是划分煤基质孔隙内可流动流体和束缚流体的重要参数,其值大小可间接表明多介质渗流空间及不同尺寸孔隙分布的演化^[16,30]。姚艳斌等^[16-17,23]指出,沿离心状态煤样累积孔隙度曲线最大值作水平切线,并与饱水状态煤样的累积孔隙度曲线相交,在相交点作铅垂线获得的垂足所对应的弛豫时间即为 T_2 截止值(表 2)。 T_2 截止值在一定程度上可反映煤体的有效孔隙度大小, T_2 截止值越小,饱水/离心煤样的累积孔隙度差值越大^[16],表明煤体基质内束缚空间变小,且多尺度孔

隙间的贯通性增大。

表 2 液态 CO_2 循环作用褐煤的 T_2 截止值
Table 2 T_2 cutoff values of coals influenced by the cyclic effect of liquid CO_2 ms

序号	不同循环次数下的 T_2 截止值					
	0	5	10	15	20	25
IM-1	9.85	5.15	2.32	1.28	0.84	0.60
IM-2	10.84	5.39	2.32	1.24	0.88	0.60
IM-3	16.34	10.08	3.7	1.78	1.19	0.88
IM-4	11.19	5.38	2.15	1.39	0.93	0.72
IM-5	4.14	2.17	1.44	1.02	0.66	0.45
IM-6	3.66	1.92	1.30	1.03	0.68	0.50

由表 2 可知,对于同一煤样而言,随着液态 CO₂ 循环作用次数的增加, T₂ 截止值不断左移减小,表明液态 CO₂ 循环作用次数的增加,能够增大煤体内自由流体流动通道数量,有效孔隙体积不断增大;褐煤不同个体的 T₂ 截止值与循环时间时长并无明显规律,说明液态 CO₂ 循环作用煤体孔隙结构演化规律同时受煤体原始孔隙结构各向异性、不同种类颗粒分布多样性及双重孔隙应力响应复杂性等因素的影响。T₂ 截止值的界限划定可将多尺度孔隙结构分为渗流孔隙结构 (T₂ > T₂ 截止值) 和吸附孔隙结构 (T₂ < T₂ 截止值) [16-17], 而不同类型孔隙的空间体积状态可定量表征多尺度孔隙的粗糙度、复杂性及贯通性。结合毛管压力曲线的分形几何理论,得出核磁共振 T₂ 谱的分形理论模型 [27,31]:

$$\begin{cases} S_V = \left(\frac{P_c}{P_{cmin}} \right)^{D-3} \\ P_c = \left| \frac{2\sigma \cos \theta}{F_s \rho} \right| \frac{1}{T_2} \\ P_{cmin} = \left| \frac{2\sigma \cos \theta}{F_s \rho} \right| \frac{1}{T_{2max}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, S_V 为核磁共振弛豫谱中前 T_{2i} 段的累积孔隙度占总孔隙度的比; P_c 和 P_{cmin} 分别为煤体任意孔径 r 和最大孔径 r_{max} 时对应的毛管压力; σ 为流体表面张力; θ 为接触角; D 为分形维数; T_{2max} 为 T₂ 谱中最大的弛豫时间。

通过将式 (2) 进行参数代入、等式取对数等处理,可得到煤体内部总孔隙结构的分形表达方法:

$$\ln S_V = (3 - D) \ln T_2 + (D - 3) \ln T_{2max} \quad (3)$$

ZHOU Sandong 等 [26] 引入可流动流体空间的分形维数 D_{NMRM} 这一参数来表征大孔隙或微裂隙结构的复杂性。考虑到饱水-离心联测法获得的基于流体类型的孔隙结构分类 [27], 基于式 (3) 和 T₂ 截止值, 本文分别讨论了渗流孔、吸附孔和有效贯通孔隙的分形维数值 D_s, D_a 和 D_e, 如式 (4) 所示:

$$\begin{cases} \ln S_{Va} = (3 - D_a) \ln T_2 + (D_a - 3) \ln T_{2max}, (T_2 < T_{2cutoff}) \\ \ln S_{Vs} = (3 - D_s) \ln T_2 + (D_s - 3) \ln T_{2max}, (T_2 > T_{2cutoff}) \\ \ln S_{Ve} = (3 - D_e) \ln T_2 + (D_e - 3) \ln T_{2max}, \end{cases} \quad (4)$$

(饱水-离心谱差)

式中, S_{Va}, S_{Vs}, S_{Ve} 分别为弛豫谱中代表吸附孔、渗流孔和有效贯通孔隙的累积孔隙度占总孔隙度的百分比。

相关研究 [26-27,31] 指出,通过 ln S_V 与 ln T₂ 的拟合直线斜率 (3-D) 可直接计算得到 D_s, D_a 和 D_e, 间接表征煤体多尺度孔裂隙结构对液态 CO₂ 循环作用的应变响应机制。文献 [27,31-33] 阐明了多孔岩石介质的有效分形维数范围 (2~3), 认为分形维数值越接近 2, 岩石均质性越高, 越接近于 3, 岩石孔隙结构越复杂, 孔裂隙表面粗糙度越显著。为考察液态 CO₂ 循环作用后煤体多尺度孔裂隙结构的响应特征, 本文选择 ln T₂ 取值范围为 (-4, 6), 以期通过较大取值范围涵盖不同尺寸孔隙的分形信息, 根据式 (4) 分别对基于表 2 内的 T₂ 截止值所获得的渗流孔和吸附孔的分形维数进行数值拟合, 如图 4 所示, 其中 N_c 为循环次数。

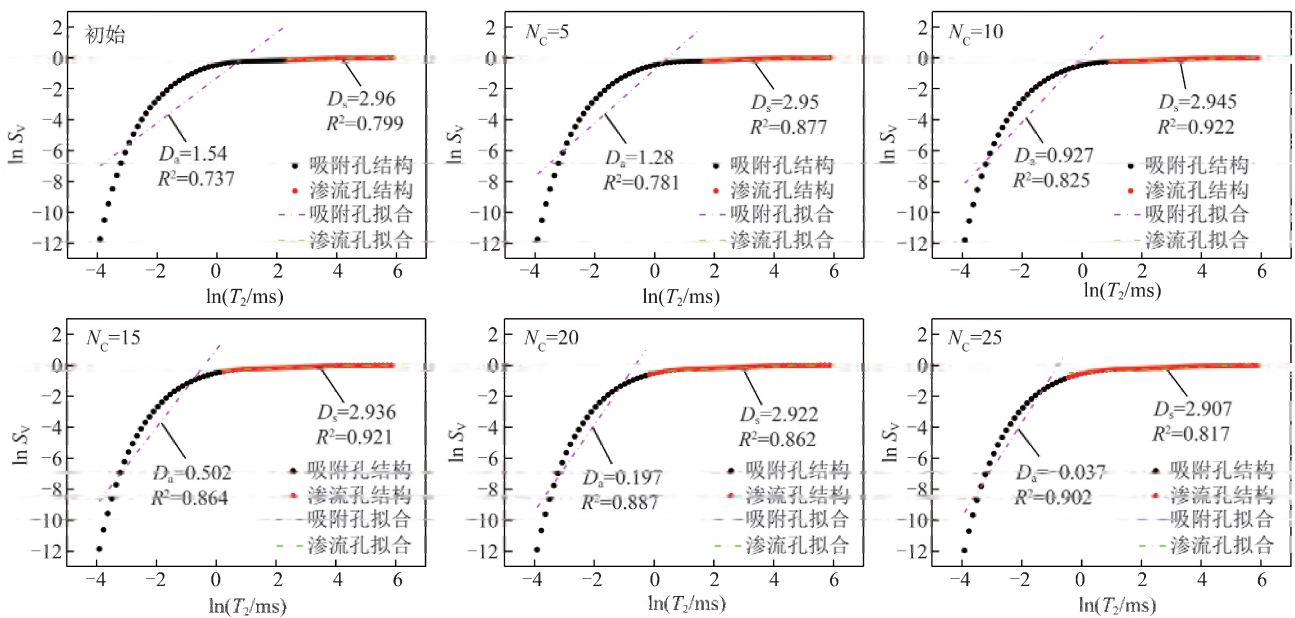


图 4 液态 CO₂ 循环作用煤样 IM-1 时吸附孔和渗流孔分形维数拟合

Fig. 4 Fractal dimension fitting of adsorbed and seepage pores for coal IM-1 under the effect of cyclic liquid CO₂

图4表示的是液态CO₂不同循环参数作用下煤样IM-1的 D_s, D_a 的拟合分布。初始条件下煤样的 T_2 截止值为9.85 ms,所对应的 D_s, D_a 分别为2.96和1.54,拟合系数均大于0.7;当液态CO₂循环作用10次、20次后,煤样的 D_a 值分别为0.927,0.197,拟合系数均大于0.8;而煤样的 D_s 值分别为2.945,2.922,拟合系数均大于0.85。煤样 D_s, D_a 随循环参数的变化行为揭示了液态CO₂循环作用能够有效改变煤体多尺度孔裂隙结构的演化规律。作用煤体的总孔隙率与残余孔隙率的差值不断增大,导致 T_2 截止值不断左移和 D_s, D_a 随不断降低。通过汇总所有煤样的 D_s, D_a 值,并对比多孔岩石的有效分形维数范围,发现液态CO₂作用后煤体的吸附孔隙不具备分形特征,渗流孔隙具有较好的分形特征。

表3为液态CO₂循环作用后各煤样的 D_s 值及相应的拟合常数。液态CO₂循环作用后,所有煤样的渗流孔隙分形维数 D_s 均随着循环次数的增大而不断减小,表明 T_2 截止值的左移使得更多较小的 $\ln S_V$ 散点参与拟合,而线性拟合的斜率($3-D_s$)不断增大,最终导致 D_s 不断减小。当液态CO₂循环作用5,15,25次时,煤样的 D_s 范围分别为[2.95,2.96],[2.927,2.940],[2.895,2.910];当液态CO₂循环作用20,40,60 min时,煤样的 D_s 范围分别为[2.910,2.97],[2.899,2.97],[2.90,2.97]。煤样 D_s 与循环参数间的耦合关系表明液态CO₂循环作用所诱发的循环热应力促进小尺寸孔隙向大尺寸孔隙的演变,有效提高煤体孔隙度。

孔隙的有效贯通程度是决定煤层流体运移难易

表3 液态CO₂循环作用后煤体渗流孔隙分形维数拟合

Table 3 Fractal dimension fitting of seepage pores within coals under the effect of cyclic liquid CO₂

序号	$N_c=0$		$N_c=5$		$N_c=10$		$N_c=15$		$N_c=20$		$N_c=25$	
	D_s	R^2	D_s	R^2	D_s	R^2	D_s	R^2	D_s	R^2	D_s	R^2
IM-1	2.96	0.80	2.95	0.88	2.945	0.92	2.936	0.92	2.922	0.86	2.907	0.82
IM-2	2.97	0.76	2.95	0.85	2.947	0.92	2.939	0.92	2.93	0.89	2.910	0.83
IM-3	2.96	0.76	2.95	0.84	2.937	0.92	2.927	0.94	2.91	0.92	2.896	0.91
IM-4	2.97	0.67	2.95	0.79	2.940	0.89	2.932	0.90	2.918	0.87	2.899	0.85
IM-5	2.96	0.76	2.96	0.84	2.950	0.85	2.937	0.83	2.92	0.78	2.895	0.73
IM-6	2.97	0.81	2.96	0.89	2.948	0.89	2.940	0.88	2.92	0.85	2.900	0.82

水平的关键因素,其值大小是衡量煤体透气性优劣的科学标准。根据式(4),对饱水-离心联测法获得的有效贯通孔隙的分形维数进行数值拟合,如图5所示。需要说明的是,部分煤样在饱水、离心状态下的起始弛豫时间的幅值相同,导致核磁幅值差为0,在对0值取对数时存在数据异常现象,考虑到数据的有效性和结果统一可对比性, D_s 计算所选择的 $\ln T_2$ 取值范围为(-1.2,4.2)。煤样IM-1,IM-2,IM-3,IM-6的 D_s 范围分别为2.746~2.810,2.767~2.809,2.068~2.644,2.70~2.784;而煤样IM-4,IM-5初始状态下的 D_s 分别为1.846,1.916,液态CO₂循环作用后相应煤体的 D_s 范围分别2.317~2.2.673,2.279~2.697。不同煤样的 D_s 范围演化规律表征液态CO₂循环作用可促进煤体产生显著的体积应变,循环温度冲击持续弱化基质颗粒黏结强度,产生的张拉应力诱发微裂隙发生贯通,部分闭孔在新生裂隙的衍生扩展下与原始裂隙网发生贯通,造成渗流孔隙数量和空间体积不断增大,煤体有效孔隙表面粗糙度及贯通性大幅增加,实现了液态CO₂循环热应力积极改造煤体孔隙结构的定量表征。

2.4 孔隙几何分形与核磁渗透率关系

图6为液态CO₂作用后煤体 D_s 与 T_2 截止值、总孔隙率 φ_t 、有效孔隙率 φ_e 之间的相关关系。其中,煤体 D_s 与 T_2 截止值之间存在一定的指数关系,当 T_2 截止值小于3 ms时,煤体 D_s 值随 T_2 截止值的增大急剧增加,且液态CO₂循环作用后煤体 D_s 值主要分布在[2.895,2.97]内,说明液态CO₂循环作用后煤体内渗流孔体积占比不断增加,大尺度孔裂隙的复杂性大幅提升;当 T_2 截止值大于3 ms时,煤体 D_s 值呈离散化分布,整体随 T_2 截止值的增大变幅平缓。通过对比 φ_e, φ_t 与 D_s 的离散点分布发现,随着 D_s 的增大, φ_e 散点分布相对较为集中,且与 D_s 存在较好的线性拟合关系,而 φ_t 散点分布较为分散,随 D_s 值的增大呈递减趋势。 D_s 与 T_2 截止值、孔隙率之间的拟合关系如式(5)所示。通过3者的数值拟合关系发现,液态CO₂循环作用能够驱使煤体基质内孔隙扩容及微裂隙变宽延伸等行为的发生,形成的孔裂隙网络为流体自由运移(水侵、离心)提供充分的流动通道,揭示了煤体多尺度孔裂隙结构在液态CO₂循环作用下的体积变形规律。

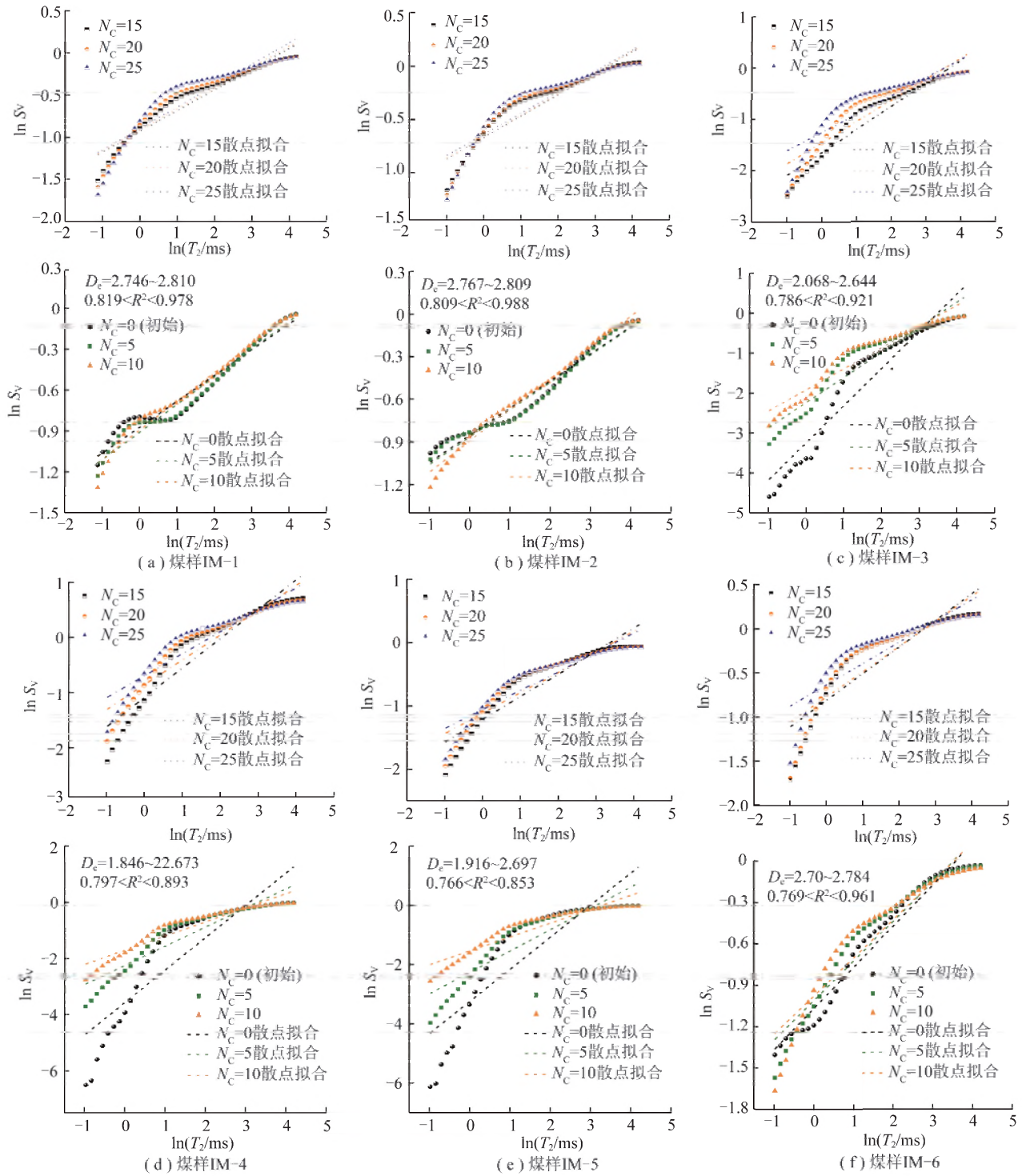


图 5 液态 CO₂作用后不同煤样的有效孔隙分形维数 D_e 分布

Fig. 5 Fractal dimension distribution of effective pores (D_e) of different coals under the cyclical effect of liquid CO₂

$$\begin{cases} D_s = 2.96 - 0.1 \exp(-T_{2cutoff}/0.86), R^2 = 0.744 \\ \varphi_e = 381.9 - 128.3 D_s, R^2 = 0.904 \end{cases} \quad (5)$$

煤体渗透率大小表征煤体基质内部多尺度孔隙间的贯通性能及允许流体通过能力的强弱。相关文献指出^[17,24,34], T-C 模型和 PP 模型不适合低渗透率煤样,且 PP 模型需要大量的测试数据才能够保证其准确性,相比 SDR 模型,其改进模型具

有较高的精确度。其中 SDR 改进模型如式(6)^[24]所示:

$$k_{SDR-d} = 0.0224 (T_{2gm}^a)^{1.534} (T_{2gm}^b)^{0.182} \quad (6)$$

其中, k_{SDR-d} 为核磁渗透率; T_{2gm}^a, T_{2gm}^b 分别为饱水煤样和离心煤样的 T_2 几何平均数。图 7 为液态 CO₂ 循环作用下煤样的核磁渗透率分布,其中,煤样 k_{SDR-d} 值与循环次数之间存在指数拟合关系,与循环时间之间无

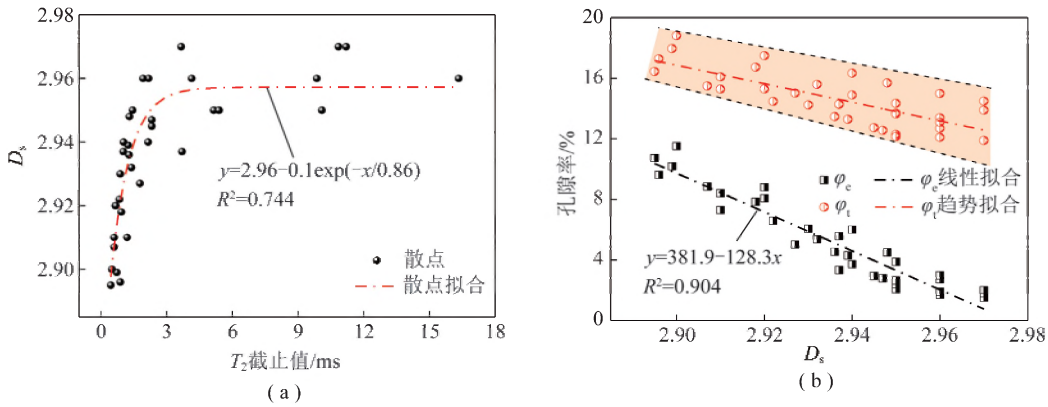


图 6 渗流孔分形维数与 T_2 截止值、孔隙率之间的关系

Fig. 6 Relations among the fractal dimension of seepage pore and T_2 cutoff value and porosity

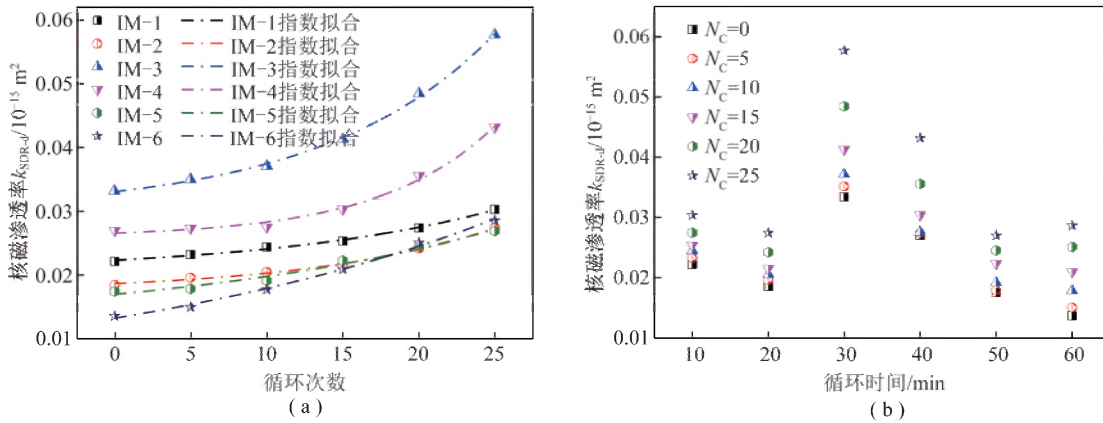


图 7 不同循环参量作用下煤样的核磁渗透率变化

Fig. 7 Change of nuclear magnetic permeability of coals affected by liquid CO_2 with different parameters

明显规律。当液态 CO_2 循环作用 5, 15, 25 次时, 煤样 IM-2 的 k_{SDR-d} 值分别为 0.01968×10^{-15} , 0.02152×10^{-15} , $0.02743 \times 10^{-15} m^2$; 而 IM-6 的 k_{SDR-d} 分别变成 0.01507×10^{-15} , 0.02099×10^{-15} , $0.02864 \times 10^{-15} m^2$ 。当循环时间 $T_{CT} = 10, 40, 60 min$ 时, 在经历相同循环次数 25 次之后, IM-1 的 k_{SDR-d} 由初始状态时的 $0.02221 \times 10^{-15} m^2$ 变成 $0.03037 \times 10^{-15} m^2$; IM-4 的 k_{SDR-d} 由初始状态时的 $0.02704 \times 10^{-15} m^2$ 变成 $0.04319 \times 10^{-15} m^2$; 而 IM-6 的 k_{SDR-d} 则由初始状态时的 $0.01366 \times 10^{-15} m^2$ 变成 $0.02864 \times 10^{-15} m^2$ 。不同煤样的 k_{SDR-d} 值演化规律表明液态 CO_2 循环作用可显著提高煤体渗透率, 基质结构和颗粒分布的各向异性导致相同作用煤体的渗透率演化存在差异性。液态 CO_2 循环作用次数越多, 煤体受到“冷冲击-升温”的次数越多, 循环热应力的产生导致煤体孔隙结构愈加复杂, 孔裂隙间的贯通促进渗透率快速增加。受基质内颗粒尺寸分布及传热系数较小等因素的影响, 长时间液态 CO_2 作用所导致的渗透率变化相对较小。为进一步考虑煤样的渗透率变化程度, 需要对渗透率变化率 Δk_{SDR-d} 进行研究, 定义 Δk_{SDR-d} 为

$$\Delta k_{SDR-d} = \frac{\Delta k_{SDR-d}}{k_{SDR-d0}} \times 100\% = \frac{k_{SDR-di} - k_{SDR-d0}}{k_{SDR-d0}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, k_{SDR-d0} , k_{SDR-di} 分别为初始条件、循环作用条件下煤样的核磁渗透率。

图 8 为液态 CO_2 循环作用后煤体渗透率变化率 Δk_{SDR-d} 演变规律。从图 8 中看出, Δk_{SDR-d} 与循环次数之间呈指数增长趋势, 褐煤 Δk_{SDR-d} 之间的大小关系大致为: IM-6 > IM-4 > IM-3 > IM-5 > IM-2 > IM-1。 Δk_{SDR-d} 与循环时间之间大致呈现“先增长—后减小—再增长”的变化过程, 但整体上存在着增长趋势。通过对比褐煤在不同循环参量因素影响下的 Δk_{SDR-d} 增长潜力来看, 液态 CO_2 循环次数对煤体渗透率改造能力要强于循环时间因素的改造能力。

煤体内渗流孔和有效贯通孔的体积增加能够大幅劣化煤体基质整体结构, 通过减小流动阻力实现流体的自由运移。图 9 为液态 CO_2 循环作用前后煤体 D_s , k_{SDR-d} , Δk_{SDR-d} 的散点分布。随着 D_s 值的不断增大, k_{SDR-d} 和 Δk_{SDR-d} 散点呈“单调递减式”分布, 部分较大离散化程度的散点分布较为分散, 导致彼此之间的线性关系拟合度较低, 但整体存在负相关关系。究

其原因,煤体渗透率是煤体基质允许流体通过能力的定量表征指标,其大小受孔隙度、渗流方向上孔隙几何尺寸、颗粒大小及排列方向等因素的影响。当流体以速度 v_0 流入孔隙结构后,受基质内孔隙及裂隙表面粗糙度的影响,流体出现扩散滤失现象,且摩擦阻力的产生导致流出孔隙结构的速度 v_1 减小。液态 CO₂ 循环作用后,不同尺度孔裂隙产生不同程度的体积应

变,导致裂隙尺度非均一、裂隙比表面积跃变等现象的发生,最终在流体压力梯度的驱动下实现流体运移的能量最小损失^[35]。

为减少煤体润湿性和毛细管力的影响,通过考察同一煤样饱水、离心 2 种状态下的流体体积差值,揭示有效贯通孔隙结构和孔渗特征参数的耦合关系。图 10 为液态 CO₂ 作用后煤体 D_e, φ_e 和 Δk_{SDR-d} 的散点

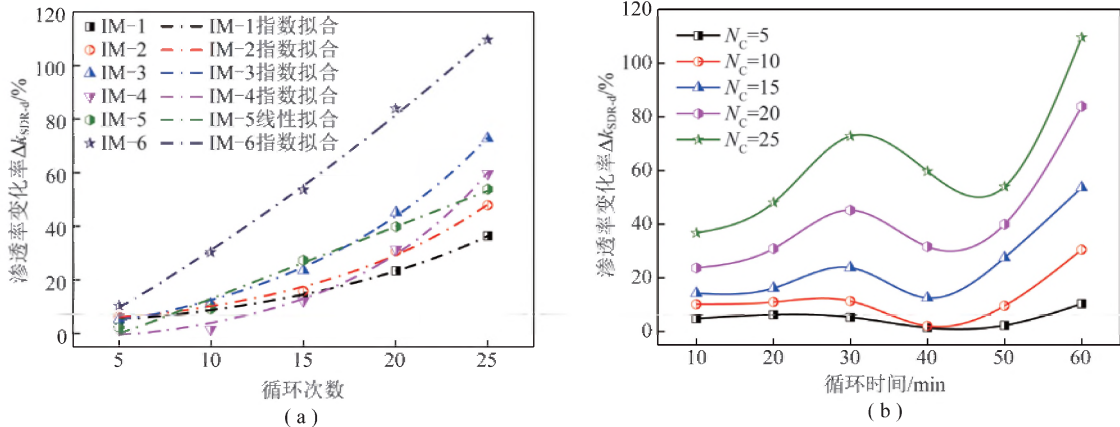


图 8 液态 CO₂ 循环作用后煤体渗透率变化率

Fig. 8 Permeability change rate of the coals influenced by cyclic liquid CO₂ effect

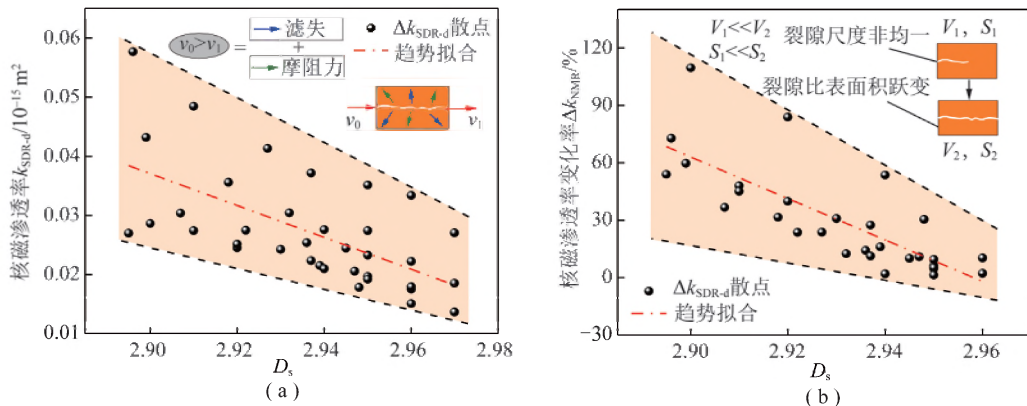


图 9 渗流孔分形维数 D_s 与 $k_{SDR-d}, \Delta k_{SDR-d}$ 的散点分布

Fig. 9 Scatters of seepage pore fractal dimension D_s, k_{SDR-d} , and Δk_{SDR-d}

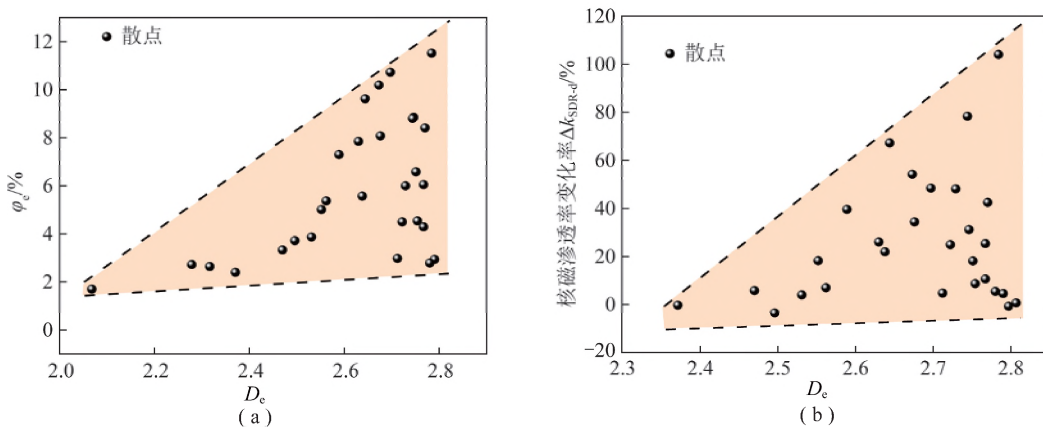


图 10 有效贯通孔分形维数 D_e 与 $\varphi_e, \Delta k_{SDR-d}$ 的散点分布

Fig. 10 Scatters of effectively connected pore fractal dimension D_e, φ_e , and Δk_{SDR-d}

分布, φ_e 和 $\Delta k_{\text{SDR-d}}$ 整体上分别与 D_e 正相关。首先, 基于饱水-离心联测的 T_2 谱幅值差和孔隙率差分别对应得到有效贯通孔和 φ_e , 2 者之间的正相关关系表征液态 CO_2 循环作用能够促进煤体原始裂隙的扩容和新生裂隙的出现, 不同尺度孔裂隙结构的互相贯通增大流体存储空间体积, 离心掉的自由流体特征参数可映射出液态 CO_2 循环作用煤体的渗透率变大。其次, $\Delta k_{\text{SDR-d}}$ 是由初始渗透率和作用后渗透率 2 者的差值比, 其值越大, 表征液态 CO_2 循环作用后煤体的渗透性能越好, D_e 与 $\Delta k_{\text{SDR-d}}$ 的正相关关系说明煤体内小尺度孔裂隙结构出现延伸长度增加及宽度增大, 流体运移阻滞力减小, 提高了煤体孔隙结构改造能力。

3 结 论

(1) 液态 CO_2 循环作用后饱水煤体的 T_2 谱幅值和曲线覆盖范围不断增大, 离心煤样的谱线幅值和有限区间宽度不断变小。2 种状态下的幅值差值正相关于循环参量, 表明液态 CO_2 循环作用可增加储水自由流动通道数量, 提高煤体有效孔隙率。

(2) 液态 CO_2 循环作用后, 煤体 T_2 截止值左移减小, 导致渗流孔和吸附孔的分形维数不断减小, 且吸附孔不具备分形特征, 渗流孔具有较好的分形特征。煤样的 D_e 与 T_2 截止值存在指数拟合关系, 与 φ_e 存在线性递减拟合关系, 整体分布与 φ_e 负相关。

(3) 煤样 $k_{\text{SDR-d}}$ 值与循环次数之间存在指数拟合关系, 与循环时间之间无明显规律。 $\Delta k_{\text{SDR-d}}$ 与循环次数之间呈指数增长趋势, 与循环时间之间大致呈现“先增长—后减小—再增长”的变化过程, 但整体上存在着增长趋势。

参考文献 (References):

- [1] 周福宝, 刘春, 夏同强, 等. 煤矿瓦斯智能抽采理论与调控策略[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2377-2387.
ZHOU Fubao, LIU Chun, XIA Tongqiang, et al. Intelligent gas extraction and control strategy in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2377-2387.
- [2] 程远平, 董骏, 李伟, 等. 负压对瓦斯抽采的作用机制及在瓦斯资源化利用中的应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1466-1474.
CHENG Yuanping, DONG Jun, LI Wei, et al. Effect of negative pressure on coalbed methane extraction and application in the utilization of methane resource [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1466-1474.
- [3] 曹佐勇, 何学秋, 王恩元, 等. 新建突出煤矿“先抽后建”模式与实施路径[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 425-433.
CAO Zuoyong, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Model and implementation path of “pumping in advance and then construction” for a new coal and gas outburst mine [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 425-433.
- [4] BULLEN RS, LILLIES AT. Carbon dioxide fracturing process and apparatus[P]. US Patent: 4374545, 1983.
- [5] REEVES S R. An overview of CO_2 -ECBM and sequestration in coal seams[A]. Carbon Dioxide Sequestration in Geological Media—State of the Science: AAPG Studies in Geology[C]. Houston: 2009, 59: 17-32.
- [6] 叶建平, 张兵, SAM Wong. 山西沁水盆地柿庄北区块 3#煤层注入埋藏 CO_2 提高煤层气采收率试验和评价[J]. 中国工程科学, 2012, 14(2): 38-44.
YE Jianping, ZHANG Bing, SAM Wong. Test of and evaluation on elevation of coalbed methane recovery ratio by injecting and burying CO_2 for No. 3 coal seam of north section of Shizhuang, Qingshui Basin, Shanxi [J]. Strategic Study of CAE, 2012, 14(2): 38-44.
- [7] 周西华, 门金龙, 宋东平, 等. 液态 CO_2 爆破煤层增透最优钻孔参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 524-529.
ZHOU Xihua, MEN Jinlong, SONG Dongping, et al. Research on optimal borehole parameters of antireflection in coal seam by liquid CO_2 blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 524-529.
- [8] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态 CO_2 相变定向射孔致裂增透技术及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1938-1950.
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Research and application on technology of increased permeability by liquid CO_2 phase change directional jet fracturing in low-permeability coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1938-1950.
- [9] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态 CO_2 相变射孔破岩及裂隙扩展力学机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3154-3168.
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Mechanism of breaking and fracture expansion of liquid CO_2 phase change jet fracturing in low-permeability coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3154-3168.
- [10] 文虎, 李珍宝, 王振平, 等. 煤层注液态 CO_2 压裂增透过程及裂隙扩展特征试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2793-2799.
WEN Hu, LI Zhenbao, WANG Zhenping, et al. Experiment on the liquid CO_2 fracturing process for increasing permeability and the characteristics of crack propagation in coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2793-2799.
- [11] WEN Hu, LI Zhenbao, DENG Jun, et al. Influence on coal pore structure during liquid CO_2 -ECBM process for CO_2 utilization [J]. Journal of CO_2 Utilization, 2017, 21(9): 543-552.
- [12] ROY Pratanu, WALSH DC Stuart, MORRIS Joseph P, et al. Studying the impact of thermal cycling on wellbore integrity during CO_2 injection[A]. The 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium[C]. Houston, 2016: 26-29.
- [13] 翟成, 马征. 煤体层理方向对液态 CO_2 致裂效果的影响规律[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(2): 1-9.
ZHAI Cheng, MA Zheng. Influence of bedding planes in coal mass on fracturing effect when cyclically injecting liquid CO_2 [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35(2): 1-9.
- [14] XU Jizhao, ZHAI Cheng, LIU Shimin, et al. Pore variation of three different metamorphic coals by multiple freezing-thawing cycles of liquid

- CO₂ injection for coalbed methane recovery [J]. *Fuel*, 2017, 208(11):41-51.
- [15] XU Jizhao, ZHAI Cheng, LIU Shimin, et al. Investigation of temperature effects from liquid CO₂ with different cycle parameters on the coal pore variation based on infrared thermal imagery and low-field nuclear magnetic resonance [J]. *Fuel*, 2018, 215(3):528-540.
- [16] 姚艳斌, 刘大锰, 蔡益栋, 等. 基于 NMR 和 X-CT 的煤的孔裂隙精细定量表征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(11):1598-1607.
- YAO Yanbin, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography [J]. *Science China: Earth Science*, 2010, 40(11):1598-1607.
- [17] 姚艳斌, 刘大锰. 基于核磁共振弛豫谱技术的页岩储层物性与流体特征研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1):181-189.
- YAO Yanbin, LIU Dameng. Petrophysical properties and fluids transportation in gas shale: A NMR relaxation spectrum analysis method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1):181-189.
- [18] 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(6):292-302.
- [19] YAO Yanbin, LIU Dameng. Comparison of low-field NMR and mercury intrusion porosimetry in characterizing pore size distributions of coals [J]. *Fuel*, 2012, 95(5):152-158.
- [20] ZHAI Cheng, QIN Lei, LIU Shimin, et al. Pore Structure in coal: pore evolution after cryogenic freezing with cyclic liquid nitrogen injection and its implication on coalbed methane extraction [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(7):6009-6020.
- [21] WESTPHAL H, SURHOLT I, KIESL C, et al. NMR measurement in carbonate rocks: Problems and an approach to solution [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2005, 162(3):549-570.
- [22] TIMUR A. Pulsed nuclear magnetic resonance studies of porosity, movable fluid, and permeability of sandstones [J]. *Journal of Petrol Technology*, 1969, 21(6):775-786.
- [23] 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.
- [24] YAO Yanbin, LIU Dameng, LIU Jungang, et al. Assessing the water migration and permeability of large intact bituminous and anthracite coals using NMR relaxation spectrometry [J]. *Transport in Porous Media*, 2015, 107(2):527-542.
- [25] 谢和平, 鞠杨. 混凝土微观损伤断裂的分形行为[J]. *煤炭学报*, 1997, 22(6):28-32.
- XIE Heping, JU Yang. Fractal characteristics of meso/micro damage and fracture of concrete [J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(6):28-32.
- [26] ZHOU Sandong, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. Fractal characterization of pore-fracture in low-rank coals using a low-field NMR relaxation method [J]. *Fuel*, 2016, 181(10):218-226.
- [27] 张全培, 吴文瑞, 刘丽萍, 等. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组超低渗透储层孔隙结构及其分形特征[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(3):20-31.
- ZHANG Quanpei, WU Wenrui, LIU Liping, et al. Pore structure and fractal characteristics of ultra-low permeability reservoirs in Yanchang Formation in Zhenbei area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(3):20-31.
- [28] 杨赫, 程卫民, 刘震, 等. 注水煤体有效渗流通道结构分形特征核磁共振试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(4):1279-1286.
- YANG He, CHENG Weimin, LIU Zhen, et al. Fractal characteristics of effective seepage channel structure of water infusion coal based on NMR experiment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4):1279-1286.
- [29] 梁志凯, 李卓, 姜振学, 等. 基于 NMR 和 SEM 技术研究陆相页岩孔隙结构与分形维数特征——以松辽盆地长岭断陷沙河子组页岩为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2020, 42(3):313-328.
- LIANG Zhikai, LI Zhuo, JIANG Zhenxue, et al. Characteristics of pore structure and fractal dimension in continental shale based on NMR experiments and SEM image analyses—A case study of Shahezi shale in Changling Fault Depression of Songliao basin, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2020, 42(3):313-328.
- [30] XU Jizhao, ZHAI Cheng, RANJITH Pathegama Gamage, et al. Petrological and ultrasonic velocity changes of coals caused by thermal cycling of liquid carbon dioxide in coalbed methane recovery [J]. *Fuel*, 2019, 249(8):15-26.
- [31] QIN Lei, ZHAI Cheng, LIU Shimin, et al. Fractal dimensions of low rank coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw based on nuclear magnetic resonance applied for coalbed methane recovery [J]. *Powder Technology*, 2018, 325(2):11-20.
- [32] 贺伟, 钟孚勋, 贺承祖, 等. 储层岩石孔隙的分形结构研究和应用[J]. *天然气工业*, 2000, 20(2):67-70.
- HE Wei, ZHONG Fuxun, HE Chengzu, et al. Fractal texture research on the pores in reservoir rocks and its application [J]. *Natural Gas Industry*, 2000, 20(2):67-70.
- [33] 黄金亮, 董大忠, 李建忠, 等. 陆相页岩储层孔隙分形特征——以四川盆地三叠系须家河组为例[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(9):1611-1618, 1708.
- HUANG Jinliang, DONG Dazhong, LI Jianzhong, et al. Reservoir fractal characteristics of continental shale: An example from Triassic Xujiahe Formation shale, Sichuan Basin, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(9):1611-1618, 1708.
- [34] 叶朝辉, WIND R, MACIEL G. 中国煤的磁共振研究[J]. *中国科学(A 辑)*, 1988, 18(2):163-172.
- YE Chaohui, WIND R, MACIEL G. Magnetic resonance studies of coal in China [J]. *Science China (A Series)*, 1988, 18(2):163-172.
- [35] 郭保华. 岩石裂隙面粗糙度参数关系分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(2):241-246.
- GUO Baohua. Relationship among several roughness parameters of rock fracture surfaces [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(2):241-246.