

循环等离子体击穿受载煤体电学响应及 孔隙结构演化规律

张祥良^{1,2,3}, 林柏泉², 申 建^{1,3}, 朱传杰²

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘 要:煤层增透是提高瓦斯高效抽采效率、降低瓦斯灾害事故的关键,以物理放电为基础的等离子体是煤层增透的有效手段之一。但以往的研究集中在单次击穿煤体孔-裂隙结构的表征,忽略了等离子体对煤体的极化效应,对循环等离子体作用下受载煤体电学性质及孔隙结构的演化特征缺乏深入研究。为此,对多个煤样进行了循环等离子体击穿实验,结合高压衰减棒和罗氏线圈监测了击穿煤体过程中的电压、电流波形,并分析了预击穿周期、等离子体击穿周期、波峰个数、峰值电压、峰值电流及能量转化效率等电学参数的变化规律;采用低场核磁共振方法测试了击穿1次、5次、10次、15次、20次条件下小孔、中孔、大孔及微小裂隙的演化规律;结合几何分形理论对击穿煤体渗流孔分形维数进行了探讨。研究表明,预击穿周期仅有首次放电是千微秒级别,之后会“断崖式”下降至几十微秒,而等离子体击穿周期则随着击穿次数的增加呈现出“阶梯式”的增长;能量转化效率维持在28.7%~55.9%,呈现出先快速增加后趋于平稳的趋势,说明等离子体对煤体电学性质的极化效应是有限的;煤体内部中孔、大孔的增长幅度最为明显,部分微小裂隙结构会实现从无到有的突破,表明等离子体对瓦斯的渗流会有显著的改善效果;分形维数在击穿后呈现出降低的趋势,则从孔-裂隙空间维度的角度证实了击穿煤体内原本孤立的孔隙结构会被裂隙沟通;孔隙率与能量转化效率变化趋势的相似性表明等离子体对煤体电学性质产生了影响,煤体电学性质发生改变后又会等离子体通道的分布产生影响。

关键词:孔-裂隙结构;电学响应;循环等离子体;煤层增透;瓦斯

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2023)04-1567-17

Electrical response and pore structure evolution affected by cyclical plasma breakdown

ZHANG Xiangliang^{1,2,3}, LIN Baiquan², SHEN Jian^{1,3}, ZHU Chuanjie²

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process under Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Artificial improvement of coal seam permeability is the key to solve the low gas drainage efficiency and prevent gas dynamic disaster. Plasma based on physical discharge is one of the effective means of coal seam antireflection. However, previous studies focus on the characterization of pore-fissure structure of single breakdown, ignore the polariza-

收稿日期: 2022-04-08 修回日期: 2022-09-22 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0463

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20221122); 江苏省卓越博士后计划资助项目 (2022ZB510); 华能集团总部科技资助项目 (HNKJ20-H87)

作者简介: 张祥良 (1993—), 男, 江苏徐州人, 博士。E-mail: xl_zhang0719@163.com

引用格式: 张祥良, 林柏泉, 申建, 等. 循环等离子体击穿受载煤体电学响应及孔隙结构演化规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1567-1583.

ZHANG Xiangliang, LIN Baiquan, SHEN Jian, et al. Electrical response and pore structure evolution affected by cyclical plasma breakdown[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1567-1583.



移动阅读

tion effect of plasma on coal, and lack of in-depth research on the electrical properties and the evolution characteristics of pore-fissure structure under the action of cyclical plasma of loaded coal. In this paper, the cyclical plasma breakdown experiments of coal samples were carried out. The voltage and current waveforms in the process of coal breakdown were monitored thorough combining with high-voltage attenuation rod and the Roche coil, and the variation of electrical parameters such as pre-breakdown period, plasma breakdown period, number of wave peaks, peak voltage, peak current and energy conversion efficiency were analyzed. The evolution of small pores, medium pores, large pores and micro cracks under the conditions of 1, 5, 10, 15 and 20 times of breakdown was tested by NMR. The fractal dimension of seepage pore was also discussed through geometric fractal theory. The results show that the pre-breakdown period is at the level of thousands of microseconds only for the first time, and then it will drop to tens of microseconds, while the plasma breakdown period shows a “ladder” growth with the increase of breakdown times. The energy conversion efficiency is maintained at 28.7%–55.9%, showing a trend of rapid increase at first and then stable, indicating that the polarization effect of plasma on the electrical properties of coal is limited. The growth rate of medium and large pores is the most obvious, and some micro fracture structures will achieve a “0” breakthrough, indicating that plasma will significantly improve the seepage of gas. The fractal dimension shows a decreasing trend after breakdown, which proves that the originally isolated pore structure will be connected by the fracture from the perspective of pore fracture space dimension. The similarity between the change trend of porosity and energy conversion efficiency shows that plasma has an impact on the electrical properties of coal, and the change of coal electrical properties will also have an impact on the distribution of plasma channels.

Key words: pore-fracture structure; electrical response; cyclical plasma; coal seam antireflection; gas

我国煤层普遍存在“高瓦斯、低渗透、难抽采”等赋存特点^[1],大多数煤层渗透率通常只有 $10^{-19} \sim 10^{-18} \text{ m}^2$,而瓦斯(煤层气)作为一种清洁能源,不仅能够优化我国能源结构做出重要贡献,同时又是诱发煤与瓦斯突出灾害的主要原因之一^[2]。因此,实现瓦斯的高效开采对降低碳排放、缓解环境压力、减少瓦斯灾害具有重要意义,煤层增透是破解瓦斯抽采效率低的关键^[3]。

布鲁克斯于 1879 年发现了等离子体,后朗格缪尔提出了等离子体(Plasma)的概念^[4]。温度由低到高逐渐变化的过程中,物体会先后经历固、液、气 3 种不同的状态。若温度继续升高,气体状态下原本处于稳定的原子、分子会出现电离激发的现象,形成电子、带电粒子以及未被电离的中性分子组成的混合体系,这种由大量带电粒子以及中性粒子组成的体系即广义的等离子体。

基于脉冲功率技术的快速发展,以物理放电为基础的等离子体具有能量密度大、破坏性强、温度高、可重复操作、放电连续的特点^[5],在纳秒级的时间内能够聚焦到 $10 \sim 100 \text{ J/cm}^2$ 的能量,同时产生 $1 \sim 10 \text{ GPa}$ 的压力^[6],在矿山、石化能源开采领域引起了高度关注^[7-8],并取得了初步成效,如张永民等^[9]通过顺层钻孔内水介质环境下等离子体放电引爆聚能棒的方式对煤层进行了增透,以贵州水城煤矿为例,放电后单个钻孔平均每天瓦斯抽采量提高 3.37 倍,瓦斯

抽采体积分数提高了 2.31 倍。脉冲功率技术通常需要利用高压充电电源将较低功率($\times 10^{-1} \text{ MW}$)的初级电能进行一系列的压缩与变化,转化为较高功率($\times 10^3 \text{ MW}$)的能量存储起来,最终将其施加到负载(本文指煤)上。在高功率电场的作用下煤骨架分子、黏土矿物分子、孔隙内部的气体分子以及离子不断地被激发产生极化和弛豫现象,从而在煤体内部形成等离子体通道,在通道的极速膨胀与冲击作用下实现煤体致裂^[10]。以电破碎为原理的等离子体在致裂坚硬煤岩方面具有能量利用率高的优势,不论所处的环境是液体介质还是空气介质,放电电极均是直接与煤体进行接触,放电间隙由煤体的厚度决定,等离子体通道直接形成在煤体内部,在等离子体通道的膨胀应力和冲击波的作用下,煤体从内部产生裂隙结构,是一种由内向外的破碎形式。

煤体是一种介于导体与绝缘体之间的半导体介质,电阻通常较大,在强电场的作用下其电学性质往往会比较容易发生改变,影响等离子体通道在煤体内部的分布,进而影响煤体内部孔隙和裂隙的扩展规律。LIN 等^[11]对比分析了煤样在干燥、饱和去离子水及饱和离子水 3 种情况下的临界击穿电压,并指出煤体的临界击穿电压与离子溶液浓度之间存在负指数函数关系;ZHANG 等^[12]研究了未受载煤体在 5 次等离子体击穿条件下的电流波形,发现峰值电流随击穿次数的增加是逐渐增加的;闫发志等^[13]研究了击穿电压

对电流波形的影响规律,发现等离子体击穿煤体首个波峰的峰值电流随击穿电压的增加是增加的;针对液电效应方面, HAN 等^[14]研究了等离子体击穿纯水介质、金属丝、包裹含能材料的金属丝等不同介质条件下的电压、电流波形,并进一步分析了峰值电压、峰值电流、击穿延时等电学参数的变化规律,得出含能材料的引入可以有效的增加水中放电冲击波的强度与能量; PENG 等^[15]开展了在岩石中内嵌金属丝并进行等离子体击穿的实验,发现单次放电条件下峰值电流与预设电压呈正相关关系,且电流波形以衰减的振荡波形式存在,同时电流波形存在单个正向振荡波、多个正向振荡波与负向振荡波共存的多种复杂情况。

在孔-裂隙结构方面,李兵磊等^[16]基于核磁共振技术发现等离子体击穿后大孔孔隙度变化率为 27%~715%,小孔孔隙率变化率为 29%~213%,表明等离子体对岩石微观孔隙结构具有较好的改善效果。YAN 等^[17]通过压汞、液氮吸附等测试方法研究了电容个数、电压等电路系统参数对煤体孔隙结构的影响,结果表明增加电容与电压均可以显著改善中孔、大孔在煤体总孔隙中所占比例; ZHANG 等^[18]基于核磁共振测试方法,研究了击穿电压对微观孔隙结构的影响规律,并结合分形几何理论分析了渗流孔分形维数与击穿电压的内在联系;赵胤翔等^[19]以煤体强度为出发点研究了煤体强度对裂隙扩展的影响规律,发现对于强度较大的煤体形成贯穿性裂隙所需要的击穿次数要远远大于强度较小的煤体;为探明原生裂隙对等离子体致裂效果的影响规律,李春明等^[20]对比了含裂隙煤体与原生结构煤的击穿过程,发现冲击波压力越大原

生裂隙周围越容易产生裂隙,且原生裂隙的存在对等离子体冲击波造成的裂隙具有一定的诱导作用;祝效华等^[21]发现等离子体在钻井领域的应用中存在贯穿破碎和未贯穿破碎 2 种行为,建立了一种新型的岩石击穿概率发展模型 (PDM),并借助该模型预测了等离子体通道在岩石内部的生长概率,对研究裂隙扩展规律具有重要意义。

国内外学者针对等离子体对煤体电学性质及孔-裂隙结构的影响规律已经开展了丰富的研究工作,但目前的研究集中击穿电压、电容等因素单次等离子体作用下对煤体的影响规律,忽略了等离子体击穿过程中对煤体电学性质的响应规律,而煤体电学性质发生改变后又会影响等离子体通道的形成,进而对煤体内部孔-裂隙结构的扩展造成影响,而现有研究对此缺乏深入的认识。因此,笔者基于研发的具有自主知识产权的受载煤岩等离子体致裂增渗一体化实验系统,结合低场核磁无损检测技术,对循环等离子体击穿 20 次条件下煤体的电学性质以及孔隙结构变化规律进行了深入探讨,对丰富循环等离子体作用致裂煤体孔-裂隙结构扩展机制理论的研究具有重要意义。

1 实验系统及流程

1.1 实验设备及原理

基于研发的具有自主知识产权的受载煤岩等离子体致裂增渗一体化实验系统,开展循环等离子体击穿受载煤体电学性质响应以及孔隙结构变化规律的研究。该系统主要包含三轴加载模块、测量模块、充放电模块以及限流保护模块,如图 1 所示。其中,通

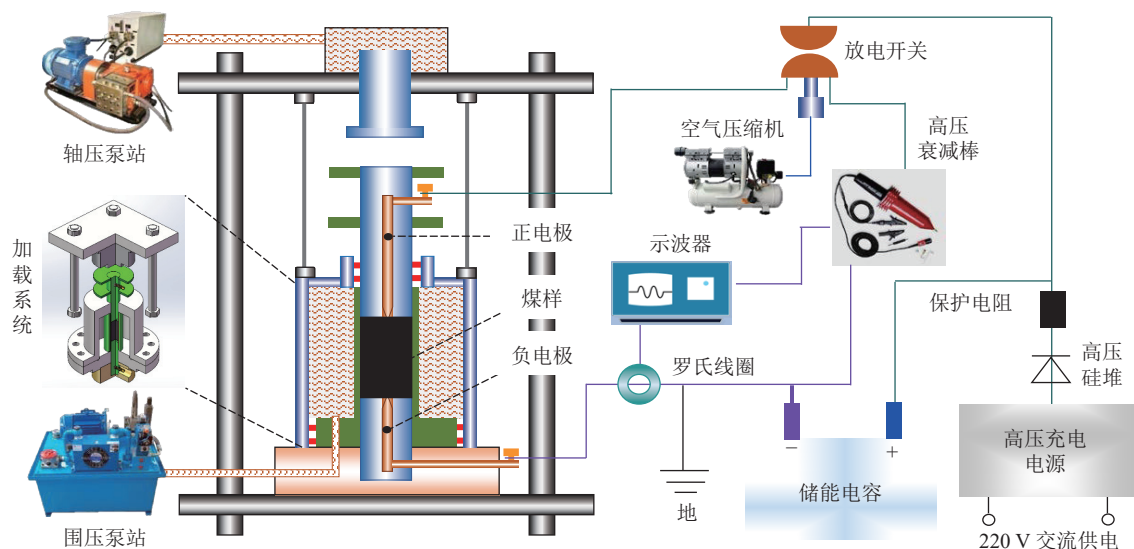


图 1 受载煤岩等离子体致裂增渗一体化实验系统

Fig.1 Integrated experimental system for plasma induced cracking and permeability enhancement of loaded coal and rock

过三轴加载模块实现给煤样施加环向及轴向应力,模拟真实的地应力情况;测量模块能够对等离子体击穿煤体过程中的瞬时电压、电流波形进行捕捉,主要由高压衰减棒、罗氏线圈以及示波器组成,其中高压衰减棒的测试范围为 0~39 kV 直流电(测试精度 $\leq 3\%$),罗氏线圈的衰减比为 1 000:1;充放电模块可以实现储能电容充电的远端控制,达到能量可控的目的,本系统储能电容为 8 μF ,最大输出能量可达 10 kJ;限流保护模块主要由高压硅堆和保护电阻组成,主要用于限制等离子体击穿煤体时产生的负向电压、电流对电路系统造成的反向冲击。

以电破碎为原理的等离子体致裂煤体基本原理如图 2 所示,在这种情况下放电电极与煤体材料直接接触,在放电的瞬间,煤体内部的粒子结构受强电场的作用被迅速极化,产生定向运移,从而使等离子体通道直接形成在煤体内部。通常情况下等离子体通道在煤体内部形成的过程中伴随着较高的能量密度、温度以及压力,因此等离子体对煤体作用过程既存在物理反应,也会发生化学反应。此外,从图 2 可以看出,等离子体致裂煤体的过程主要包括能量沉积、等离子体放电与煤样破碎 3 个主要过程,放电环境也可以是水介质、绝缘油介质、空气介质等绝缘性较强的介质。

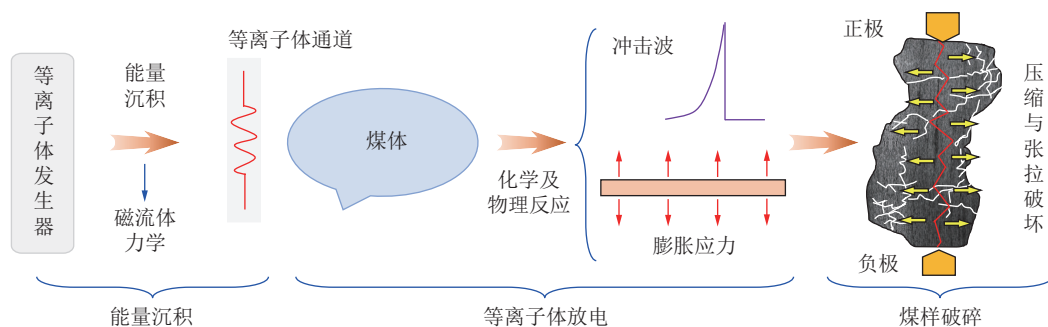


图 2 等离子体致裂煤体原理

Fig.2 Principle of plasma breaking coal sample

笔者选取 NMR 技术 (Nuclear Magnetic Resonance) 对煤体内部的孔隙结构进行表征,一方面是由于该技术具有无损表征的优势,即实验前后仅需对煤样进行饱水、离心处理即可进行孔-裂隙结构的测试;另一方面是由于该技术具有检测孔隙范围广的优势^[22],如图 3 所示,能够充分反应煤体内部孔隙结构多尺度的特点。而现有煤体孔-裂隙结构检测方法中,无论是图像法还是定量法,对检测样品都具有一定的要求,如 OM(Optical Microscope)、SEM(Scanning Electron Microscope)、TEM(Transmission Electron Microscope)、AFM(Atomic Force Microscope) 均需要将样品加工成 1 cm^2 左右的小方块才可进行测量^[23]; CT(Computed Tomography) 虽然不需要对样品进行二次加工,但对于尺寸较大的样品而言,则无法对微观孔隙结构进行表征^[24]; SAXS(Small Angle X-ray Scattering)、 N_2 吸附、MIP(Mercury Intrusion Porosimetry) 等方法则需要将煤样加工成一定目数的粉末才可进行测量^[25],而加工的过程中对煤体本身的孔隙结构不可避免地会造成一定程度的损害。综上,笔者以低场核磁共振技术作为循环等离子体处理前后煤体孔-裂隙结构检测的方法。低场核磁共振技术通过流体介质表征煤岩孔隙的基本原理^[22]为:原子核在外加磁场的作用下会形成

有序的排列,当外加磁场消失后,原子核则会恢复初始状态,这个过程中原子核会产生可测量的信号,通过这个信号的变化即可表征煤岩孔隙结构,如图 4 所示。用水介质对煤岩孔-裂隙结构进行反演时,水介质存在 3 种弛豫行为:自由弛豫、表面弛豫以及扩散弛豫^[22]。对于均匀磁场,磁场梯度为 0,因此扩散横向弛豫时间为 0;而自由横向弛豫时间取决于流体的种类,笔者以水为介质,所以忽略不计;因此,总的横向弛豫时间可以表达为

$$\frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{T_{2S}} = \rho \frac{S_{\text{pore}}}{V_{\text{pore}}} = \rho \frac{F_s}{r_{\text{pore}}} \quad (1)$$

式中, T_2 为横向弛豫时间, s; T_{2S} 为表面横向弛豫时间, s; ρ 为横向弛豫强度; S_{pore} 为孔隙结构的比表面积, m^2 ; V_{pore} 为孔隙的体积, m^3 ; F_s 为孔隙的形状因子, 本文假设为圆柱形孔隙, 取 2; r_{pore} 为孔隙直径, nm。

由式 (1) 可以看出, 横向弛豫时间与孔隙直径之间存在正相关关系, 测试过程设置横向弛豫强度为 $0.5 \times 10^{-8} \text{ m/ms}$, 因此煤岩孔隙直径 r 与横向弛豫时间可进一步表达为

$$r = 10^{-8} T_2 \quad (2)$$

1.2 实验煤样

本文选取的煤样来自陕西黄陵煤矿 (HL) 的烟煤。

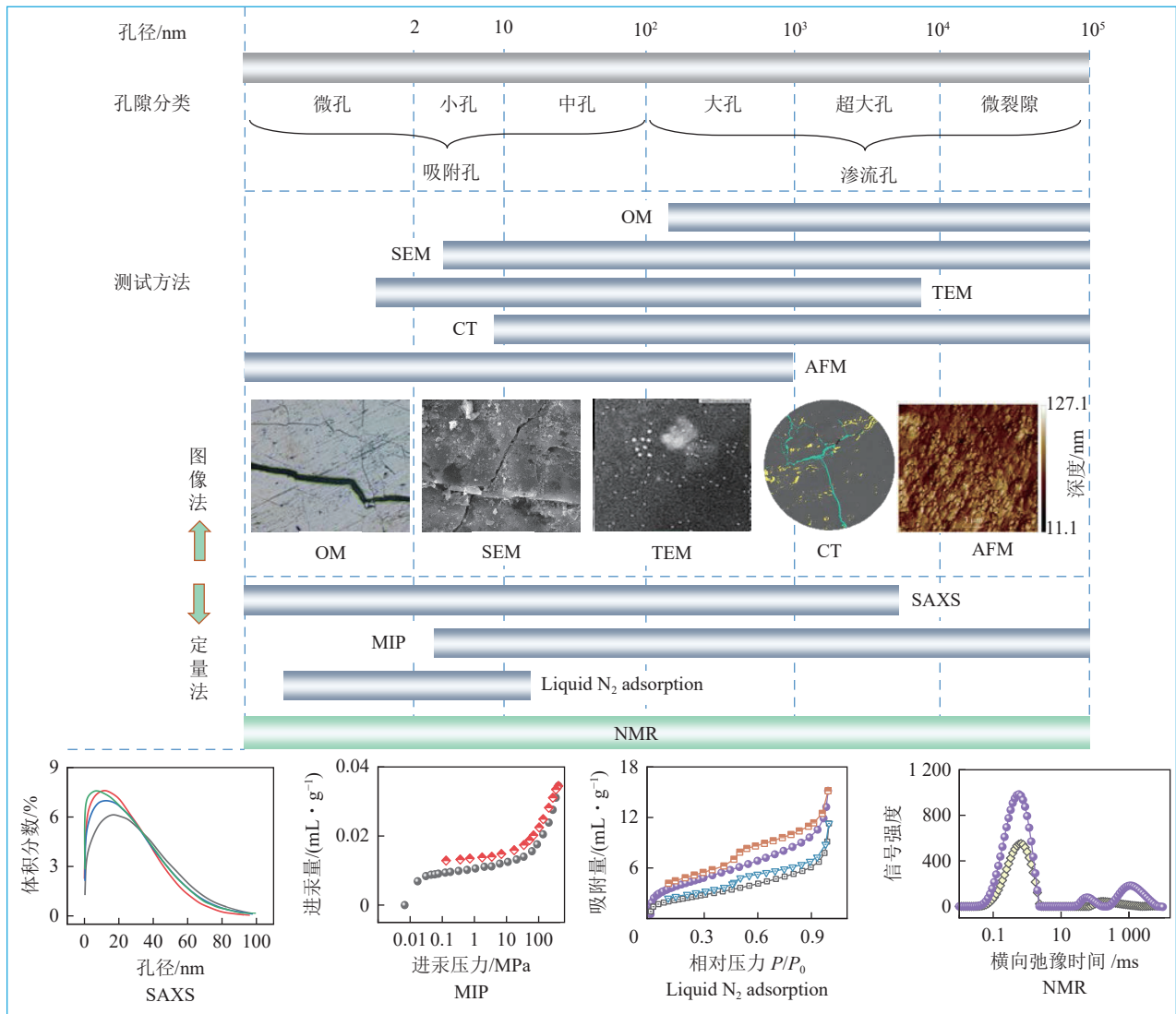
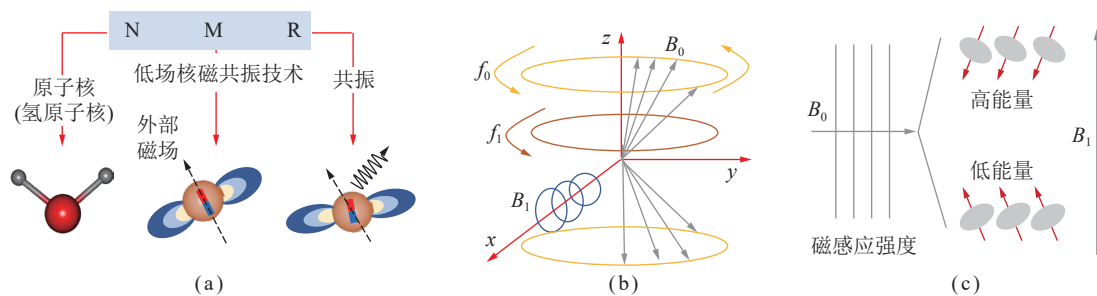


图3 不同孔-裂隙结构表征方法及适用范围

Fig.3 Applicable scope of different characterization methods of pore and fracture structure



f_0 为初始频率; f_1 为极化后频率; B_0 为初始磁感应强度; B_1 为极化后磁感应强度

图4 低场核磁测孔隙原理

Fig.4 Principle of low field NMR testing technology

将从煤矿现场取来的煤块统一加工成直径为 50 mm、高度为 50 mm 的圆柱,如图 5 所示。同时利用残存的煤样测试了样品的工业分析、元素分析及显微组分等基本参数,见表 1,以便准确判断煤样的变质程度。

1.3 实验流程

由于实验中需要先对样品进行等离子体击穿实验,然后才能够利用核磁共振技术测试煤样内部的孔隙结构,而实验中的循环等离子体击穿煤体实验需要



图 5 实验样品

Fig.5 Experimental coal samples

在受载的情况下进行,所以无法保证样品取出测完孔隙结构后还能够完整装入夹持器中再次进行等离子体击穿实验,也就意味着本实验无法仅通过单个煤样完成所有的测试工作。因此,本项目采用 5 组不同的煤样分别击穿 1 次、5 次、10 次、15 次、20 次,每组样

品中设置 3 个平行试样,以避免因样品本身结构的差异导致的实验误差。实验中轴压统一设置为 3 MPa,围压为 2 MPa。具体的实验流程如图 6 所示。

(1) 将加工好的煤柱置于 40 ℃ 的真空环境下干燥 6 h,然后将样品从干燥箱中取出,利用真空饱水仪对干燥后的煤样进行去离子水饱和 24 h,然后擦去煤样表面的水滴对煤样的质量进行称量,记为 m_1 ,然后继续饱水;每隔 1 h 将煤样从饱水仪中取出擦去表面的水滴再次对质量进行称量,记为 m_2 ;直至连续 3 次得到同一煤样质量的误差不超过 0.5 g,即认为煤样处于完全饱和的状态。饱和完成后将煤样置于低场核磁共振载床内,测试样品内部的孔-裂隙分布情况,得到煤样初始饱和状态下的 T_2 谱图。然后,利用离心机将煤样进行离心 2 h,再次利用核磁共振技术对煤样进行测试,得到煤样初始离心状态下的 T_2 谱图。

表 1 样品的工业分析、元素分析及显微组分

煤样	工业分析				元素分析				镜质组	惰质组	壳质组	$R_{o,max}$
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	O_{daf}	C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}				
HL	1.81	17.72	34.47	46.00	17.39	76.16	4.65	0.86	48.76	49.75	1.49	0.67

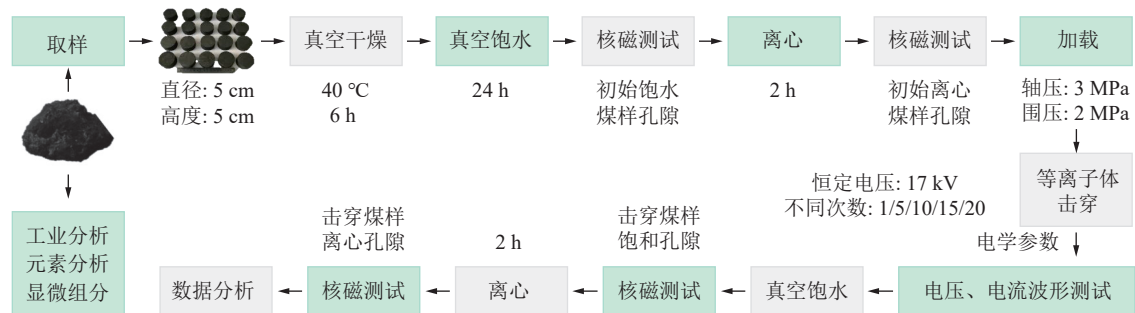


图 6 实验流程及方法

Fig.6 Experimental process and method

(2) 将步骤 (1) 中测试完的离心态煤样划分为 5 组,每组设置 3 个样品;然后,将其安装入图 3 中的加载腔体中,分别进行击穿实验,5 组样品对应的击穿次数分别为 1 次、5 次、10 次、15 次、20 次,每次循环放电间隔约为 2 min,储能电容中的电压设置为恒定电压 17 kV;为保证样品在等离子体击穿后能够完整取出,击穿前在煤样外围包裹一层热缩管,同时设置轴压为 3 MPa,围压设置为 2 MPa。该过程中即需测试不同击穿次数条件下的电压、电流波形。

(3) 为测试循环等离子体击穿对煤体电学性质的影响规律,在步骤 (2) 的基础上,重新选取了 2 个煤样进行恒定击穿电压 17 kV、循环 20 次的击穿实验,与步骤 (2) 中循环 20 次击穿的 3 个煤样共同组成了 5

个平行样品。

(4) 等离子体击穿实验完成后将煤样再次进行真空条件下的去离子水饱和,过程可按照步骤 (1) 进行操作;然后利用核磁共振技术测试不同击穿次数作用后煤样饱和状态下的 T_2 谱图;再利用离心机将煤样进行离心 2 h,测试离心后煤样孔-裂隙结构,得到击穿煤样离心状态下的 T_2 谱图。

2 实验结果与讨论

2.1 循环等离子体击穿煤体电学响应规律

2.1.1 循环等离子体击穿煤体电压与电流波形

通过图 1 中的高压衰减棒、罗氏线圈以及示波器,测试了等离子体击穿受载煤体(轴压 4.5 MPa、围压

2.5 MPa) 过程中典型的电压、电流波形, 初始电压设置为 15 kV, 如图 7 所示。整体上看, 电压、电流波形呈现出衰减的振荡波, 与现有研究结果是一致的^[26-27]。分析图中曲线变化趋势可知, 电压、电流波形按照时间可以划分为 3 个阶段: 预击穿阶段 (阶段 1)、等离子体击穿阶段 (阶段 2) 和击穿完成阶段 (阶段 3)。放电开关由断开至闭合的瞬间, 电压波形会由 0 瞬间上升至预设电压 (15 kV), 由于煤体本身具有一定的阻性, 储能电容中的能量使煤体发生极化需要一段时间, 电压波形会在一段时间内保持在预设电压附近, 同时, 由于煤体未被极化, 没能形成沿着电场方向移动的粒子流, 这段时间内没有电流产生, 此阶段称之为预击穿阶段, 电压波形维持稳定的时间称之为预击穿周期。在强电场的作用下, 煤体内部的粒子被不断极化, 形成大量沿着电场方向移动的带电粒子 (等离子体通道), 储能电容中的能量被大量消耗, 煤体两端的电压迅速衰减, 与此同时, 电流波形开始上升, 该阶段称之为等离子体击穿阶段, 整个过程所历经的时间称之为等离子体击穿周期, 该阶段内电压、电流波形均以类似于正弦波式的振荡波逐渐衰减, 直至消失。值得注意的是, 电压、电流波形中数据大于 0 的规定为正向, 小于 0 的为负向, 在等离子体击穿阶段内, 电压与电流波形的方向均会多次发生由正到负再到正的循环转变, 这是由于本实验系统与典型 RLC 振荡电路的原理结构具有相似性, 反向电压由电路中信号的振荡产生, 反向电流则由反向电压产生。随着储能电容器中的能量不断被消耗, 煤样两端的电压、电流逐渐趋近于 0, 此时, 等离子体通道也消失, 系统恢复至最初状态, 阶段 3 称之为击穿完成阶段。

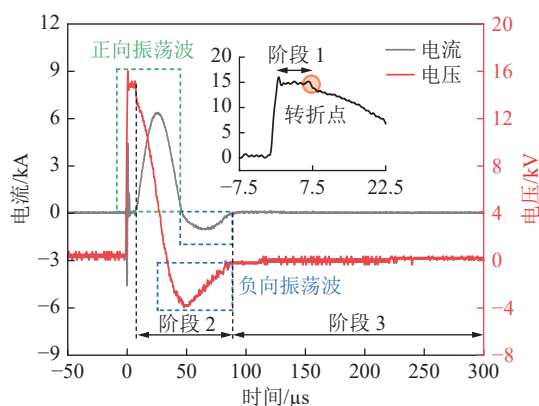


图 7 等离子体击穿煤样过程中典型电压与电流波形

Fig.7 Typical voltage and current waveforms of loaded coal sample during plasma breakdown

等离子体击穿煤体的过程中会对煤体产生极化效应, 且短时间内不会消失^[28], 为研究等离子体对煤

体电学性质的影响规律, 笔者测试了循环等离子体击穿煤体过程中的电压、电流波形, 进一步分析峰值电流、预击穿周期、等离子体击穿周期等电学参数的变化规律。由于等离子体击穿煤体过程中会使煤体发生破碎, 而煤体一旦破碎后则无法进行下一次击穿实验, 因此实验中需要给煤样施加轴压 3 MPa、围压 2 MPa 的应力环境, 使煤样在循环等离子体击穿的过程中保持固定。

图 8 为 HL 煤样循环等离子体击穿 20 次过程中的电压波形。循环等离子体击穿煤体过程中的电压波形, 与等离子体击穿煤体过程中的典型电压波形相似, 均是由预击穿阶段、等离子体击穿阶段以及击穿完成阶段 3 个部分组成。首次放电时, 由于煤体本身的阻性较大, 煤体极化所需要的时间较长 (超过 5.49 ms, 如图 8 中红色横坐标所示), 即使是超出示波器的测试范围煤体仍未被极化。短时间内, 再次对煤体进行放电时, 发现预击穿周期“断崖式”下降, 这是由于第 1 次放电时, 储能电容中的能量已经使煤体内部的粒子产生了极化, 大多数粒子积累了一定的能量, 部分粒子处于激发或者半激发的状态^[29], 因此, 当强电场再次施加在煤体上时, 煤体内部原本积累了一定能量的粒子会被迅速极化, 大量粒子汇聚到一起形成贯通煤体的等离子体通道。值得注意的是, 第 2 次放电时 (第 2 次放电及以后, 如图 8 中黑色横坐标所示), 电压波形就已经形成了负向的振荡波, 说明此时储能电容中的能量在满足击穿煤体的同时能够使电压波形发生反转形成振荡波。第 3 次放电时, 随着能量的积累, 电压波形首次出现了第 2 正向振荡波, 但波峰远低于第 1 正向振荡波。放电次数为 3~7 次时, 电压波形始终维持 2 个正向振荡波和 1 个负向振荡波。当循环击穿次数增加至第 8 次时, 开始产生第 2 负向振荡波, 第 2 负向振荡波波峰远低于第 1 负向振荡波波峰, 且随着击穿次数的增加 (第 8 至第 20 次), 第 2 负向振荡波峰值也逐渐变大, 这说明等离子体对煤体电学性质的影响是一个不断累积的过程, 放电次数越多, 影响程度就越深。

图 9 为 HL 煤样等离子体击穿 20 次过程中的电流波形。分析图 9 可以看出, 随着击穿次数的增加, 电流波形呈现出阶段性的变化特征。对于电容 8 μ F、电压 17 kV 的充电情况下, 第 1 次放电时 (如图 9 中红色横坐标所示), 由于煤体阻性较大, 短时间内煤体内部没有形成大量极化态的带电粒子, 导致煤体仍处于相对“绝缘”的状态, 因此, 未能够在煤体内部形成电流, 这从首次放电时电压波形预击穿周期较长 (超过 5.49 ms) 的特点也可以看出。经历过第 1 次放电

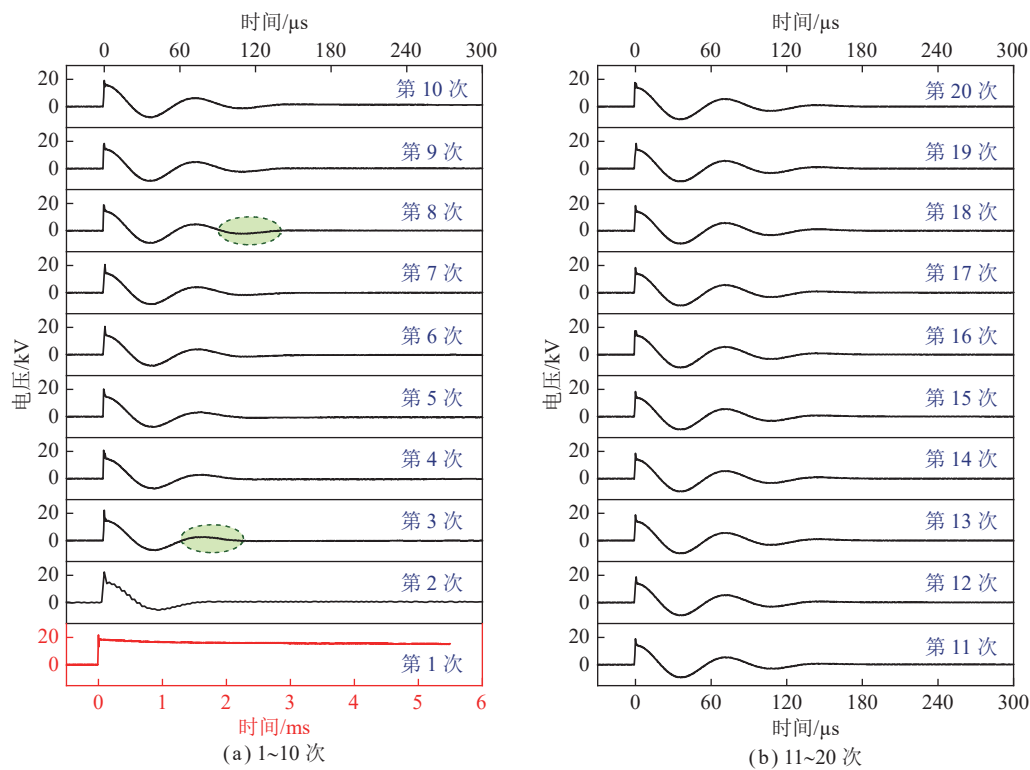


图 8 循环等离子体击穿煤体的电压波形

Fig.8 Voltage waveform of coal breakdown by cyclical plasma breakdown

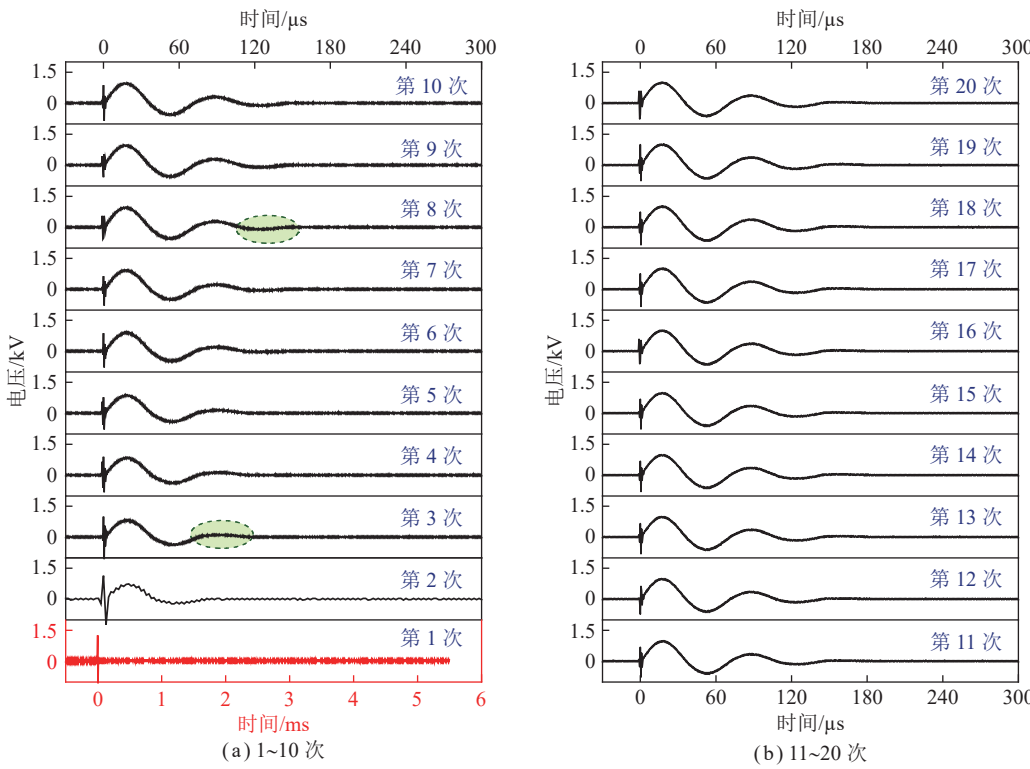


图 9 循环等离子体击穿煤体的电流波形

Fig.9 Current waveform of coal breakdown by cyclical plasma breakdown

时电能对煤体的极化作用后,第 2 次放电时(第 2 次放电及以后,如图 9 中黑色横坐标所示)形成了正向

和负向的电流振荡波各 1 个。从第 3 次放电开始,形成了第 2 正向电流振荡波,直至第 7 次放电结束,始

终维持3个振荡波,与电压波形变化趋势类似。随着能量被不断注入到煤体内部,煤体内部处于激发态的粒子数目不断增加,从第8次放电开始,电流第2负向振荡波开始出现,并随着循环等离子体击穿次数的不断增加,幅值的增长趋势也越来越明显。

分析上述实验规律可以看出,随着循环等离子体击穿次数的增加,电流通道在煤体内部的形成逐渐变得容易,这是由于以物理放电为基础的等离子体通道本身具有极高的温度和极强的极化性质,每一次放电时均会对煤体产生极化效应,使煤体内部的粒子处于一个“激活”的状态,且这个影响短时间内不会消失。因此,再次对煤体进行放电时,电流通道在煤体内部的形成会变得容易很多。

2.1.2 循环等离子体击穿煤体电学参数响应特征

预击穿周期是衡量煤体击穿难易程度的重要参数,而等离子体击穿周期对研究煤体的击穿过程具有重要意义。因此,笔者以同一煤样循环等离子体击穿20次条件下的预击穿周期和等离子体击穿周期为例,分析等离子体对煤体电学性质的影响规律。周期的变化与振荡波的个数是密切相关的,根据图8、9中的电压电流波形,对每次放电条件下的电压、电流波形振荡波的个数进行了统计,其变化趋势如图10所示。

分析图10(a)可以看出,首次放电时,由于煤体击穿难度较大,未能形成有效的击穿过程,此次所测预击穿周期超出示波器的测试范围(5.49 ms)。受第1次放电时能量对煤体极化的影响,再次对煤体放电时预击穿周期出现“断崖式”下降,第2次放电时预击穿周期仅为20 μs 。放电次数为2~9次时,预击穿周期从20 μs 下降至15 μs ,呈现出小幅度下降的趋势。第10次放电时,预击穿周期为17 μs ,再次出现小幅度上升的趋势,这是由于等离子体极化煤体的过程中形成了新的等离子体通道,导致极化时间变长。之后,预击穿周期保持稳定,一方面说明等离子体对煤体极化的影响是有限的,另一方面说明等离子体通道对煤体电学性质的影响反过来又对等离子体位置的分布产生了影响。

等离子体击穿周期则随击穿次数的增加呈现出“阶梯式”的增加趋势,整体上可以划分为3个阶段。首次放电时,等离子体通道未形成,等离子体击穿周期则为0,同时从图10(b)可以看出,首次放电时仅有一个电压振荡波,没有电流。第2次放电时,等离子体通道初次在煤体内部形成,尚处于不稳定的阶段,因此,前2次放电等离子体击穿周期处于上升阶段。放电次数为3~7次时,等离子体击穿周期上升至阶

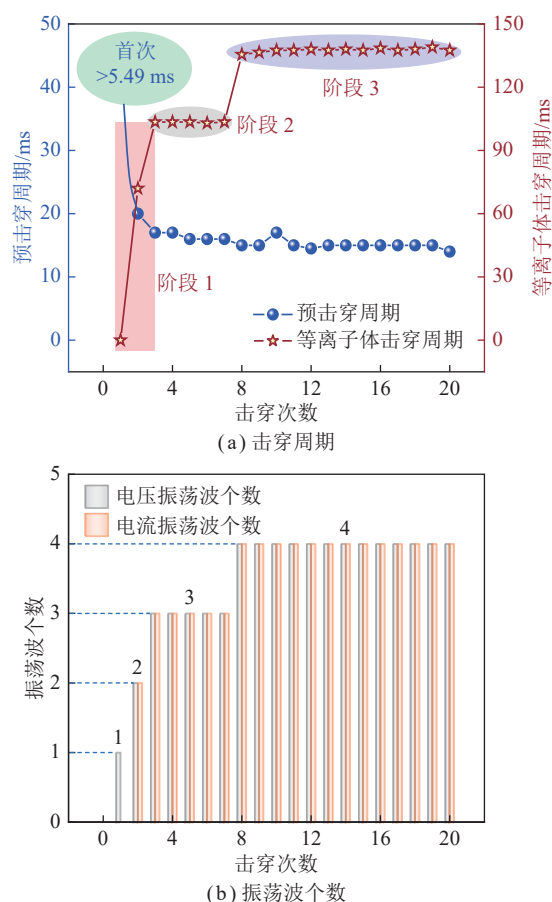


图10 击穿周期与振荡波个数

Fig.10 Breakdown period and number of oscillating waves

段2,维持在100 μs 左右,该阶段内电压与电流波形始终保持2个正向和1个负向振荡波。随着等离子体极化作用的进一步加深,电压与电流波形振荡波的个数增加至4个,等离子体击穿周期也上升至阶段3(135 μs 左右)。

分析上述实验规律可以发现,等离子体击穿周期与振荡波个数是密切相关的,在每一阶段内等离子体击穿周期均会保持稳定。随击穿次数的增加,等离子体击穿周期呈现出“阶梯式”的增加,且每一次的改变所需要的击穿次数都是不断增加的(从阶段1变化至阶段2只需要2次,阶段2变化至阶段3需要5次,12次放电都未能使阶段3继续上升),这说明,在总体能量不变的前提下,等离子体对煤体极化的影响是有限的,且超过一定极值后影响效果的增加量会逐渐变小。

电压与电流波形的峰值大小是反应等离子体通道的膨胀应力与冲击强度的关键参数,通常来讲,幅值越大对应的强度就越大^[30]。图11为循环等离子体击穿20次条件下的峰值电流与峰值电压,由于实验中所使用的电压始终固定为17 kV,所以本文未对第

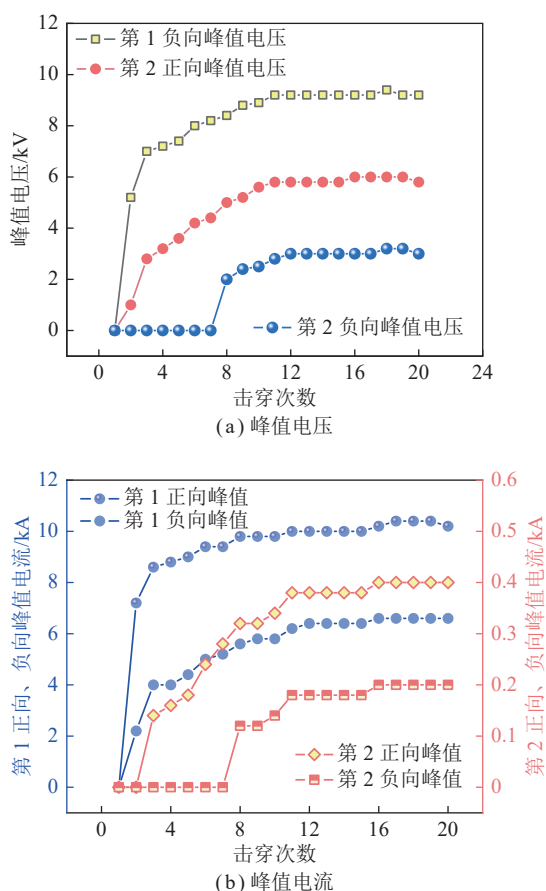


图 11 峰值电流与峰值电压

Fig.11 Peak current and voltage

1 正向峰值电压进行统计。

从图 11(a) 可以看出, 电压振荡波峰值整体上的变化规律也呈现出先快速上升, 再缓慢增加, 最终趋于稳定的趋势, 这与电流振荡波的峰值变化规律是类似的。对于预设电压 17 kV 的情况下, 电压第 1 负向振荡波峰值最大值可达 9.4 kV, 第 2 正向振荡波峰值最大值可达 6 kV, 第 2 负向振荡波峰最大值可达 3.2 kV, 这对于电路的设计及安全防护而言具有重要的指导意义。

分析图 11(b) 中曲线变化趋势可知, 电流第 1 正向振荡波峰值最高, 最高可达 10 kA 左右, 远大于其他波峰的峰值, 因此认为电流第 1 正向振荡波峰值为等离子体击穿煤体过程中的峰值电流。4 个振荡波峰值从大至小的排序依次为: 第 1 正向振荡波 (10 kA 左右)、第 1 负向振荡波 (6 kA 左右)、第 2 正向振荡波 (0.4 kA 左右)、第 2 负向振荡波 (0.2 kA 左右), 值得注意的是, 每个振荡波的峰值大小随时间出现的次序是相关的, 出现得越早其峰值也就越大。

整体上看, 4 个电流振荡波峰值的变化规律具有一定的相似性, 均可划分为 3 个阶段: 在振荡波形成

的初期, 电流振荡波峰值迅速增加, 此阶段主要是由于等离子体通道本身未完全稳定导致的, 所以电流峰值变化幅度较大; 随着能量的进一步输入, 等离子体对煤体的极化作用逐渐加深, 煤体内部处于“激活”态的粒子大量增加, 峰值电流在这个阶段内也呈现出稳定增长的趋势; 在第 3 个阶段内, 电流振荡波的峰值也逐渐趋于稳定, 这说明当能量进一步注入后, 最初形成的等离子体通道逐渐趋于稳定, 同时, 该通道周围的粒子极化需要的能量也逐渐减小, 更多的能量被用于形成新的等离子体通道, 即产生更多的电流振荡波。

由上述分析可知, 等离子体击穿煤体过程中的有用功主要发生在等离子体击穿阶段, 电能转化为破碎煤体所需的机械能也主要发生在该阶段^[31]。因此, 笔者根据等离子体击穿阶段内的电压、电流波形计算了电容中总的存储能量 (W) 向等离子体击穿阶段沉积能量 (Q) 的转化效率。电容中总的存储能量可由式 (3) 计算, 等离子体击穿阶段的沉积能量可由式 (4) 计算, 而转换效率是指等离子体击穿过程中沉积到煤体中的能量占总能量的百分比, 可由式 (5) 计算。为确保实验数据的有效性, 对 5 个煤样击穿后的能量转化效率进行了统计分析, 并计算了能量转化效率的平均值和标准差, 具体的计算结果见表 2。可以看出仅有第 1 次击穿时的标准差数值较大 (13.7), 这是由于第 1 次放电时 1 号样品和 5 号样品均未能形成有效击穿, 导致能量转化效率为 0; 其余样品从第 2 次放电至 20 次放电结束, 能量转化效率的标准差范围为 0.2%~3.8%, 可以看出, 对于各向异性的煤体而言, 标准差变化范围较小, 数据本身的可靠度是值得信赖的。

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (3)$$

$$Q = \int_0^t U(t)I(t)\cos \theta dt \quad (4)$$

$$\eta = \frac{Q}{W} \times 100\% \quad (5)$$

式中, W 为储能电容器中的初始能量, J; C 为储能电容器的电容, $8 \mu\text{F}$; U 为预设电压, V; Q 为等离子体击穿阶段沉积到煤体中的能量, J; θ 为电压与电流波形之间的相位差, 0.6π ; η 为能量转化效率, %。

图 12(a) 为循环等离子体击穿 20 次条件下能量转化效率的平均值和标准差变化规律。分析图中曲线变化趋势可知, 除第 1 次放电外, 其余击穿次数条件下能量转化效率的平均值变化范围为 28.7%~55.9%, 与文献 [32] 中提到的液电效应的能量转化效率相比要大很多。随着击穿次数的增加, 能量转化效

表2 不同击穿次数条件下的能量转化效率

Table 2 Energy conversion efficiency under different breakdown times

样品	不同击穿次数条件下能量转化效率/%																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	28.9	37.0	37.9	39.3	41.3	44.1	48.4	49.7	53.2	52.9	52.9	53.9	53.8	53.4	55.3	55.4	55.7	55.5	54.2
2	29.0	27.8	35.5	36.5	40.0	41.0	43.0	48.9	49.0	53.2	52.9	51.0	51.0	53.7	52.6	54.2	54.7	54.9	53.7	53.9
3	27.6	27.9	38.9	37.9	39.0	41.0	44.9	40.3	50.5	55.2	52.6	53.9	51.7	52.7	51.5	53.2	53.7	53.5	58.1	55.4
4	27.1	29.6	37.1	39.5	40.7	38.7	44.6	45.6	51.1	50.3	53.1	54.1	54.9	54.8	54.5	56.3	56.4	56.7	54.4	55.7
5	0	29.3	34.7	37.6	41.1	43.2	48.0	51.6	49.8	52.8	52.7	54.0	56.8	53.0	55.6	57.3	57.4	58.7	55.6	51.9
平均值	16.7	28.7	36.6	37.9	40.0	41.0	44.9	47.0	50.0	53.0	52.8	53.2	53.7	53.6	53.5	55.3	55.5	55.9	55.5	54.2
标准差	13.7	0.7	1.5	0.9	0.8	1.4	1.7	3.8	0.7	1.6	0.2	1.2	2.1	0.7	1.4	1.5	1.3	1.8	1.5	1.3

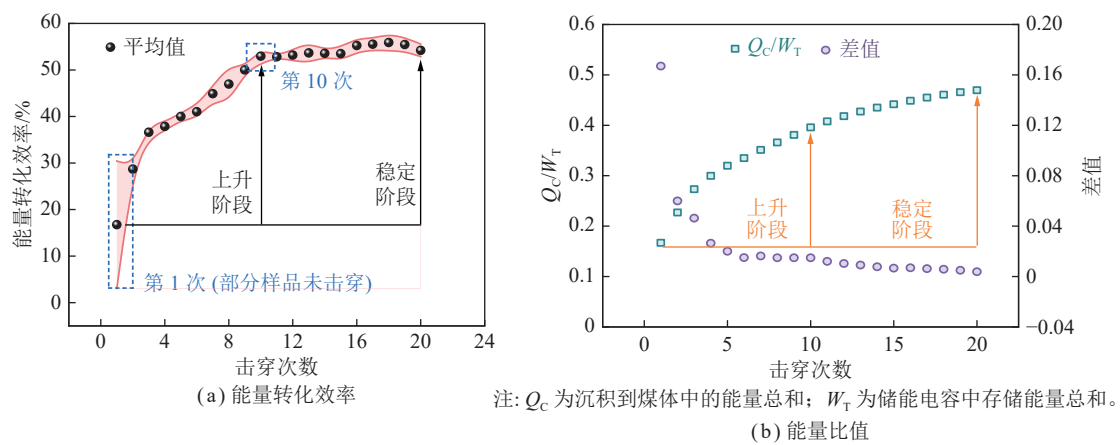


图 12 不同击穿次数条件下能量转化效率及沉积到煤体总能量与总储能的比值

Fig.12 Energy conversion efficiency under different breakdown times and ratio of total energy deposited into coal to total stored energy

率整体上呈现出上升的趋势,可以划分为2个阶段:放电次数为1~10次时,由于煤样内部的等离子体通道尚未完全形成,峰值电压、峰值电流、振荡波个数等参数也尚未稳定,因此前10次放电过程中等离子体击穿阶段的能量转化效率处于快速上升的阶段;放电次数为10~20次时,由于煤体内部的等离子体通道基本上处于相对稳定的阶段,不再继续向外扩展,因而能量转化效率也处于稳定的阶段。图12(b)沉积到煤体中的总能量与储能电容中总能量的比值,整体上看,该比值随着击穿次数的增加是逐渐增加的,但前10次放电时该比值上升速度较快,10~20次放电时增加速度明显变慢。上述实验结果表明,对于同一个煤样而言,恒定电压条件下适当增加击穿次数,有利于提高电能的整体利用率,但由于等离子体对煤体极化效应的影响有限,能量转化效率不会随击穿次数的增加而持续增加。

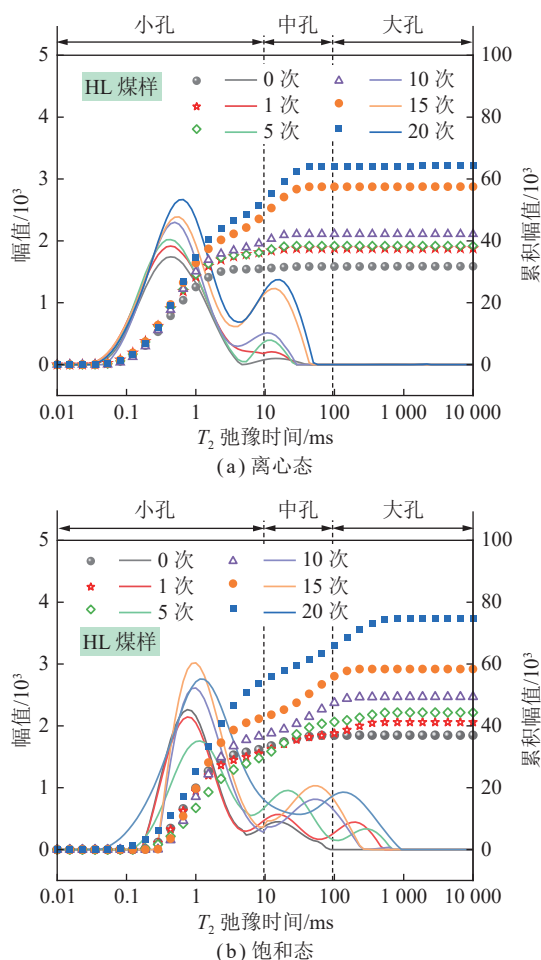
2.2 循环等离子体击穿煤体孔隙结构变化规律

笔者借助具有无损检测优势的低场核磁共振技术,对循环等离子体作用下煤体内部的孔隙结构进行

了表征。谢松彬等^[33]研究结果表明,孔径大小与横向弛豫时间 T_2 之间存在正相关关系,即 T_2 越大所对应孔隙的直径就越大,时间为 T_2 时对应的幅值大小表示当前孔径的数量。因此,笔者通过横向弛豫时间 T_2 对煤体内部孔隙结构的变化规律进行研究。

图13为循环等离子体击穿作用下HL煤样离心态、饱和态的 T_2 谱图。需要说明的是,在对煤样进行核磁共振测试时,每组实验均采用3个样品作为平行实验对象,然后对每组核磁共振曲线进行求取平均值,作为该击穿次数条件下的实验结果。分析图13(a)可知,HL煤样在击穿前后均会出现2个谱峰,该谱峰分布在小于10 ms和10~100 ms,对应的孔隙分别为小孔(<0.1 μm)和中孔(0.1~1 μm)^[22],且小孔谱峰对应的峰值远高于中孔对应的谱峰,说明HL离心态煤样内部的孔隙主要以吸附孔为主,这对于瓦斯的抽采是极为不利的。离心后煤样稍大孔隙内部的水分被去除,导致无论是击穿前还击穿后,仅能够测试到煤体内部的微小孔隙。

从图13(b)可以看出,HL煤样击穿前(0次)饱和

图 13 不同击穿次数条件下 HL 煤样 T_2 谱图Fig.13 T_2 spectra of HL coal sample under different breakdown times

状态下的 T_2 谱峰主要由 P1 和 P2 组成,结合击穿前离心态的谱峰可知,HL 煤样在未击穿的状态下内部孔隙结构以直径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的微小孔为主,这对于瓦斯的抽采是极为不利的。与离心态相比,饱和后煤样的弛豫曲线的幅值具有明显右移的现象,说明击穿后煤体孔径整体上具有扩大的趋势,且随着等离子体循环放电次数的增加,尤其是针对中孔和大孔阶段的渗流孔隙而言,谱峰位置既存在上升的趋势,又同时存在右移的现象,这说明中孔的和大孔的数量不断增多,孔径尺寸也不断增大。整体上看,击穿后的谱峰在幅值、个数以及对应的时间上均发生了明显的变化,且是朝着有利于疏通瓦斯抽采通道的方向发展的。与未击穿煤样相比,在击穿 1 次和 5 次的情况下,小孔阶段的谱峰出现了明显的下降,这是由于煤体内部初始状态的小孔在等离子体通道膨胀应力和冲击波的作用下相互沟通,形成了孔径稍大的中孔、大孔;随着击穿次数的不断增加,等离子体冲击波沿着通道半径不断向外围扩展,使致裂范围的半径不断扩大,对更

广范围的孔隙和裂隙结构进行改善。

不同直径的孔隙在瓦斯抽采过程中扮演的角色不同,因此,笔者针对循环等离子体作用下煤体内部的小孔、中孔、大孔及微小裂隙结构的改善效果进行了分析。定义煤体在离心态、饱和态条件下内部各阶段孔隙的增长率为 $\Delta\varphi_C$ 、 $\Delta\varphi_S$,根据式 (6)、(7) 可分别计算各阶段孔隙的增长率。

$$\Delta\varphi_C = \frac{\sum A_{iC} - A_{0C}}{A_{0C}} \times 100\% \quad (6)$$

$$\Delta\varphi_S = \frac{\sum A_{iS} - A_{0S}}{A_{0S}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, A_{iC} 、 A_{iS} 为等离子体不同循环次数作用下各阶段孔在离心态或饱和态下的累积幅值; A_{0C} 、 A_{0S} 为煤样初始状态下各阶段孔在离心态和饱和态下的累积幅值。

图 14 为等离子体不同循环次数条件下 HL 煤样离心态和饱和态下各阶段孔的累积幅值和增长率。分析图中数据可知,煤样击穿前离心状态对应的小孔、中孔累积幅值分别为 31 020、700,而大孔和微小裂隙范围内没有出现谱峰;循环击穿 20 次后对应的小孔、中孔累积幅值范围分别是 36 450~52 580、1 080~11 630,对应的孔隙增长率为 17.50%~69.50%、54.29%~1 561.42%;在击穿 10 次和 20 次 2 种情况下,离心态也出现了大孔谱峰。煤样击穿前饱和状态依然只有小孔和中孔存在,说明该煤样本身的孔隙直径偏向微小孔隙。击穿后小孔对应的幅值范围为 30 230~54 550,孔隙增长率范围为 -7.47%~66.97%,中孔对应的累积幅值范围为 5 860~12 580,孔隙增长率范围为 35.96%~191.88%;对于饱和状态下的大孔而言,均出现了不同高度的幅值,对应的范围为 2 570~9 730。

通过上述分析可以发现,无论是离心态还是饱和态,击穿后中孔、大孔及微小裂隙结构的改善效果最明显,且这种阶段的孔隙增长率均为正值,这说明等离子体在煤体内部造缝和改造中大孔方面具有一定的优势,这对于瓦斯抽采非常有利。而小孔在击穿前期具有向中孔和大孔转化的趋势,因而造成部分煤样小孔增长率为负数,随着等离子体循环次数的增加,在等离子体冲击波的作用下煤体内部将出现新的小孔,导致小孔也有一定幅度的上升。从整体上看,随着击穿次数的增加小孔、中孔、大孔及微小裂隙结构均有不同程度的增加。

通过建立流体体积与核磁共振 T_2 谱图之间的函数关系^[34],可计算得到煤样的总孔隙率大小为

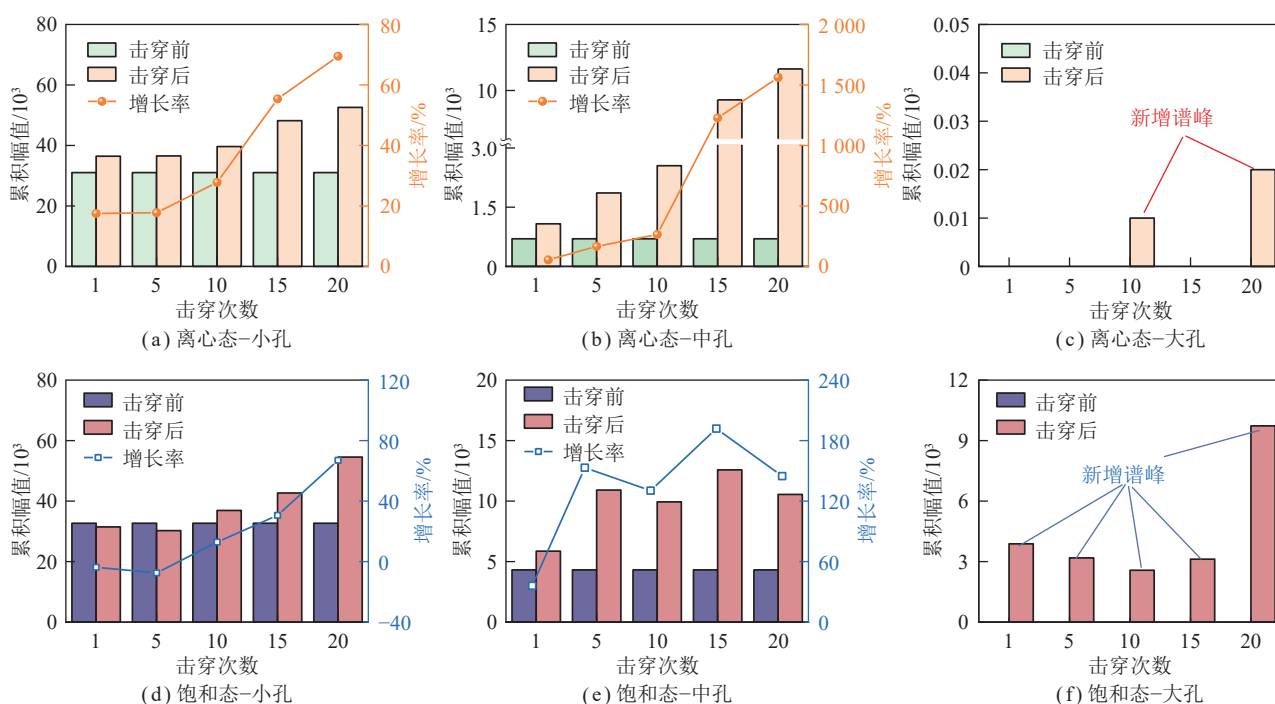


图 14 循环等离子体作用下 HL 煤样阶段孔增长率

Fig. 14 Pore growth rate of HL coal sample under cyclical plasma breakdown

$$\varphi_T = \frac{V'}{V} \times 100\% = \frac{6S + 9250}{10\,000V} \times 100\% \quad (8)$$

其中, φ_T 为煤样的总孔隙率; V' 为流体的体积, cm^3 ; V 为煤样的总体积 (煤样高度 5 cm, 直径 5 cm), cm^3 ; S 为煤样所测 T_2 图谱与弛豫时间所形成的面积, 可通过式 (9) 进行计算:

$$S = \int A(T_i) dT \quad (9)$$

式中, A 为弛豫时间为 T_i 时的振幅; T 为弛豫时间, ms。

图 15 为击穿煤体 NMR 孔隙率随循环等离子体击穿次数的变化规律。分析图 15 中曲线变化规律可知, 煤样在未击穿的情况下离心态和饱和态的孔隙率分别为 0.45% 和 0.93%; 循环等离子体击穿 20 次条件下离心态煤样的孔隙率为 0.54%~2.17%, 增长倍数为 0.19~3.80 倍; 饱和态煤样的孔隙率为 5.31%~17.66%, 孔隙率增长倍数为 4.71~17.97 倍。由此可见, 等离子体在改善煤体孔隙率方面具有一定的优势。此外, 从图中可以看出, 随着击穿次数的增加, 离心态孔隙率呈增长趋势, 而饱和态则随着击穿次数的增加呈现先上升、后下降、再上升的趋势, 这可能是由于在击穿的初期煤体内部形成贯通性的裂隙结构, 在煤样饱水的过程中水分比较容易进入煤体内部, 从而可测完整的孔隙率; 随着击穿次数的增加, 膨胀应力和冲击波在裂隙周围不断扩展, 产生粉碎区域, 使煤体破碎成较小的颗粒从而堵塞了饱水过程中水分进入煤

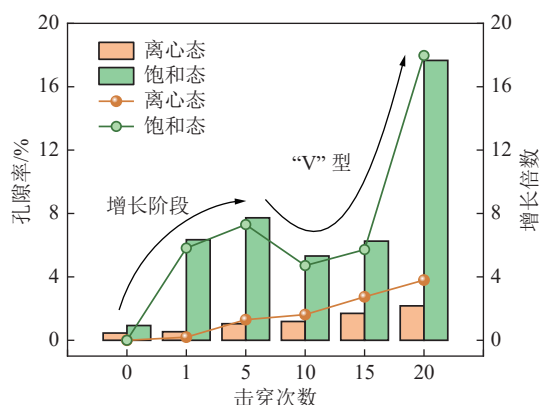


图 15 循环等离子体击穿煤体 NMR 孔隙率

Fig. 15 NMR porosity of coal treated by cyclical plasma breakdown

体孔隙和裂隙中, 导致无法得到完整的孔隙率; 当击穿次数再次增加时, 堵塞的通道再次被打开, 从而使孔隙率再次突然上升。

煤体内部的孔隙结构具备分形特征, 而分形维数能够定量表征孔隙结构空间维度的变化规律。核磁共振作为一种无损检测技术, 对煤体内部孔隙结构多尺度特性的表征具有一定的优势, 基于核磁共振检测的煤体内部孔隙结构分布结果, 计算孔隙结构分形维数的变化特征能够更加准确地表征煤体内部孔隙结构的变化规律。横向弛豫时间 T_2 、 S_v 、 D 之间存在如下关系, 通过式 (8) 可分别计算得出循环等离子体作

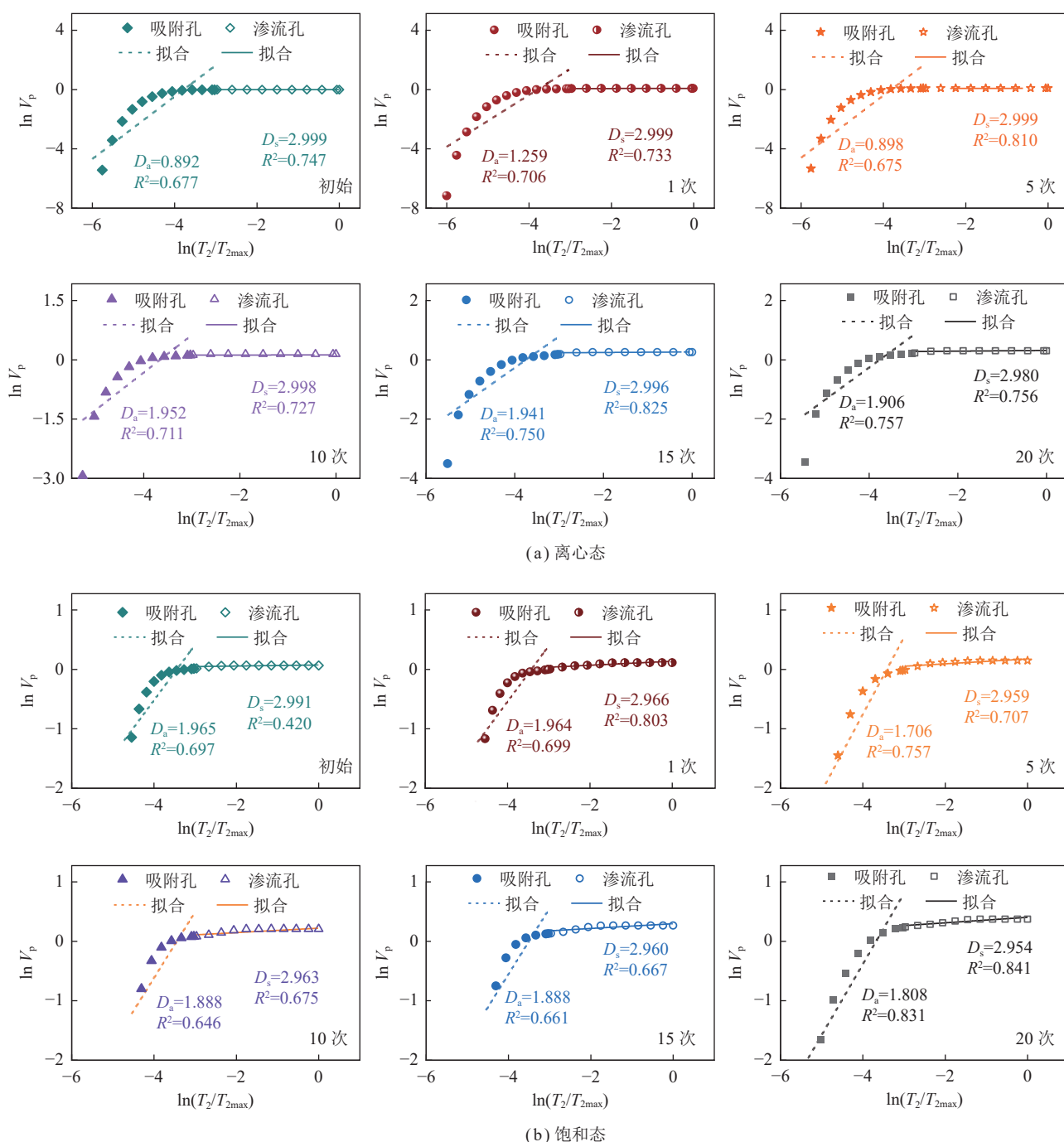
用下吸附孔 ($T_2 < 10$ ms)、渗流孔 ($T_2 > 10$ ms) 分形维数的变化规律。

$$\ln S_v = (3 - D) \ln T_2 + (D - 3) \ln T_{2\max} \quad (10)$$

式中, S_v 为 $0 \sim T_2$ 内所测孔隙的体积占该样品总体积的比值; D 为吸附孔或渗流孔的分形维数。

通过分形维数可以表征煤体内部复杂孔隙结构占据空间维度的大小^[35], 对于不同维度的几何体而言, 分形维数有着不同的数值范围, 二维平面的分形维数

介于 $1 \sim 2$, 三维几何体的分形维数介于 $2 \sim 3$ 。根据图 16 的计算结果可以看出, 无论是离心态还是饱和态, 击穿前后吸附孔的分形维数均小于 2, 这与理论上吸附孔的维度特征是不相符的, 因此可以认为基于核磁共振技术所测的吸附孔不具备分形特征, 这与现有研究中的结论是相一致的^[22, 36]。对于渗流孔而言, 其分形维数的范围均在 $2 \sim 3$, 表明其分形特征较好。为此, 笔者针对循环等离子体作用下渗流孔在离心态和



注: V_p 为核磁共振 T_2 谱图中孔径 r 对应的累积振幅; D_a 为吸附孔分形维数; D_s 为渗流孔分形维数。

图 16 基于 NMR 的循环等离子体击穿煤体分形维数拟合

Fig.16 Fractal dimension fitting of coal breakdown by cyclical plasma based on NMR

饱和态下的分形维数进行了统计(图17)。0~5次放电时煤体内部裂隙比较明显,即裂隙是从无至有的变化过程,原本孤立的孔隙群被裂隙贯通,所以导致渗流孔分形维数下降速度较快;而5~10次有所回升,可能是因为随着击穿次数的增加,煤体内部新增了裂隙结构,导致孔-裂隙结构整体的空间维度上升;随着击穿次数的进一步增加(10次放电之后),虽然煤体内部的孔隙率快速增加,但相互连通的孔-裂隙结构明显增多,对于饱和态煤样而言,在核磁测试的过程中,由于水介质的具有连通的特征,这种连通的较大孔隙和微小裂隙被认作是单个连通空间,从而使渗流孔隙所占据的空间维度降低。而在10次放电的基础上逐渐增加放电次数对增加新裂隙空间的作用效果不再明显,所以通过核磁所测数据计算得来的分形维数在10次放电之后变化趋势也不再显著。

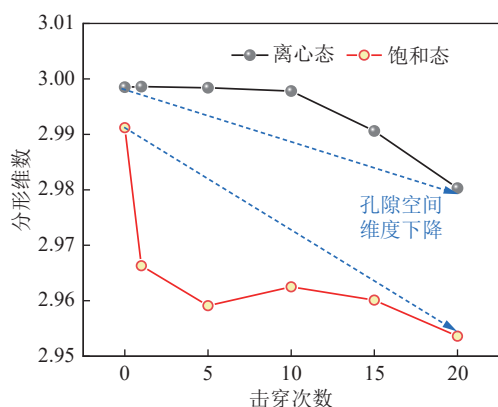


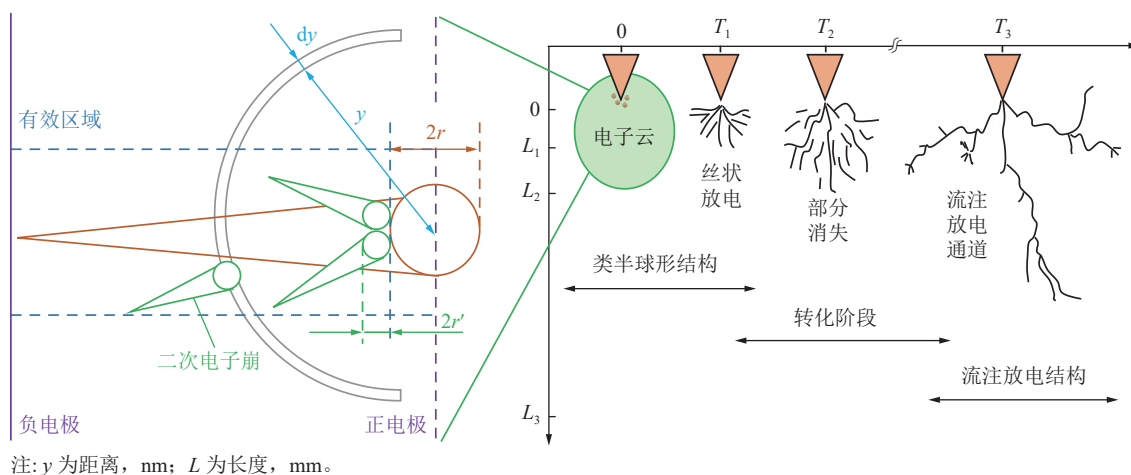
图17 循环等离子体作用下分形维数

Fig.17 Fractal dimension treated by cyclical plasma breakdown

2.3 循环等离子体对煤体孔隙结构影响机理探讨

正电荷和负电荷在外加电场的作用下朝着相反

的方向进行运动,进而造成正电荷和负电荷中心不重合的现象称之为极化。通常情况下,由于地层水中溶解了部分离子,在外加电场作用下液体中的离子能够定向迁移,因此地层水一般是具备导电性的^[37]。但煤体内部的煤骨架、黏土、胶结物以及孔隙中的烃类气体是不具备导电性质的,在真实的地层环境中往往在煤体的孔隙结构中形成“离子-分子-离子”的大型离子团,这种离子团在外加电场的作用下将会与煤骨架分子结构、黏土矿物中的分子结构、胶结物中的分子结构以及孔隙中的烃类气体发生极化和弛豫,这种情况下煤体内部离子或分子的极化将取代导电的形式而占据主导地位^[29]。在电场产生的循环等离子体作用下,对煤体骨架分子结构、黏土矿物分子结构等的极化过程是不断累积的,以单次放电过程中的等离子体发展过程为例,分析等离子体通道在煤体内部的形成过程,如图18所示。放电的初始阶段,正电极附近形成半球形激发态的电子云,该阶段电子云的形成过程可通过电子崩增长模型进行描述,根据汤森第一碰撞电离理论,无论是均匀电场还是非均匀电场,电子崩能够形成流注的临界条件为电子崩头部电子数量能够大于 10^8 ;随着电子崩头部的不断发展,电子云结构形成,但由于煤体本身的非均质性较大,电子云无法以球形的形态持续向外围扩展,而是在煤体内部形成几个主要的丝状支流;随着能量的进一步注入,煤体内部的能量被聚集到几个主要的丝状通道中,而部分细小的丝状通道消失,该阶段内丝状通道的长度也在逐渐增加,在丝状通道的末端被激发后的电子开始以流注态的形式发展;随着能量的进一步注入,流注通道最终形成,并贯通煤体,使煤体产生初步裂隙。



注: y 为距离, nm; L 为长度, mm。

图18 等离子体在煤体内部的发展原理

Fig.18 Development principle of plasma in coal

在初步形成的等离子体通道作用下,周围的煤体发生极化现象,短时间内这种影响并不会消失,因此,电场在短时间内再次施加在煤体上时,等离子体通道大概率会沿着上一次形成的放电通道进行扩展,这也就解释了所测击穿延时在初次放电之后会由 1 000 多微秒骤降至几十微秒的现象。与此同时,等离子体的膨胀作用和冲击波对通道处的裂隙和孔隙结构造成进一步的影响。结合循环等离子体击穿过程中能量转化效率及煤体孔隙率增长倍数可以看出,能量转化效率从第 10 次开始由快速上升转变为缓慢上升,孔隙增长率也是第 10 次放电时处于“V”型的谷底,这表明等离子体通道产生的膨胀应力和冲击波对煤体孔隙结构的影响效果具有一定限制的,其影响范围并不会随等离子体的循环次数增加而持续增加。

3 结 论

(1) 等离子体对煤体存在极化效应,首次放电后预击穿周期出现“断崖式”下降,而等离子体击穿周期则呈现出阶梯式的上升趋势,且每次发生变化时所需要的放电次数是增加的;电压与电流的峰值均随击穿次数的增加呈现出先快速增加后趋于稳定的趋势,说明等离子体对煤体的极化影响有限。对于恒定电压条件下,适当增加击穿次数有利于提高能量转化效率。

(2) 等离子体对煤体内部的中孔、大孔的改善效果最为明显,部分大孔和微小裂隙结构会实现从无至有的突破,说明等离子体在煤体内部造缝方面具有明显的优势。击穿煤体的饱和水孔隙率增长倍数为 4.71~17.97 倍,煤体击穿后,原本相互孤立、孔径较大的渗流孔被裂隙贯通,从而使击穿煤体渗流孔的分形维数降低,且随着击穿次数的增加而逐渐降低。

(3) 等离子体在煤体内部的形成分为电子崩和流注形成 2 个阶段。等离子体通道会改变煤体的电学性质,短时间内不会消失,且这个影响是有益于下一次击穿的,而煤体电学性质改变后又会影响到下一次放电时等离子体通道在煤体内部的分布,通常表现为诱导趋势。

参考文献(References):

- [1] 武强,涂坤,曾一凡,等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(6): 1625-1636.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1625-1636.
- [2] 袁亮. 我国煤矿安全发展战略研究[J]. *中国煤炭*, 2021, 47(6): 1-6.
- [3] 苏现波,宋金星,郭红玉,等. 煤矿瓦斯抽采增产机制及关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12): 1-30.
SU Xianbo, SONG Jinxing, GUO Hongyu, et al. Increasing production mechanism and key technology of gas extraction in coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 1-30.
- [4] 杨菊芳,任雅琳,陈存社,等. 低压低温等离子体促进水分蒸发的研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(6): 123-125,129.
YANG Jufang, REN Yalin, CHEN Cunshe, et al. Study on water loss under low pressure and low temperature plasma[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(6): 123-125,129.
- [5] ANDRES U. Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 97(1-4): 31-38.
- [6] 冯文然,陈光良,顾伟超,等. 脉冲高能量密度等离子体材料表面改性及其应用[J]. *物理*, 2005, 34(12): 915-921.
FENG Wenran, CHEN Guangliang, GU Weichao, et al. Surface modification of materials by pulsed high energy density plasma and its applications[J]. *Physics*, 2005, 34(12): 915-921.
- [7] BAO Xiankai, GUO Junyu, LIU Yuan, et al. Damage characteristics and laws of micro-crack of underwater electric pulse fracturing coal-rock mass[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2021, 111(5): 102853.
- [8] HUANG W, REN F, SHI F, et al. X-ray CT observations of selective damage of mineralised synthetic particles by high voltage pulses[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 143: 106007.
- [9] 张永民,蒙祖智,秦勇,等. 松软煤层可控冲击波透瓦斯抽采创新实践——以贵州水城矿区中井煤矿为例[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2388-2400.
ZHANG Yongmin, MENG Zuzhi, QIN Yong, et al. Innovative engineering practice of soft coal seam permeability enhancement by controllable shock wave for mine gas extraction: A case of Zhongjing Mine, Shuicheng, Guizhou Province, China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2388-2400.
- [10] CHO Sangho, CHEONG Sangsun, YOKOTA Matsuhiko, et al. The dynamic fracture process in rocks under high-voltage pulse fragmentation[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2016, 49(10): 1-13.
- [11] LIN B, ZHANG X, YAN F, et al. Improving the conductivity and porosity of coal with NaCl solution for high-voltage electrical fragmentation[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(4): 5010-5019.
- [12] ZHANG X, LIN B, ZHU C, et al. Petrophysical variation of coal treated by cyclic high-voltage electrical pulse for coalbed methane recovery[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 178: 795-804.
- [13] 闫发志. 基于电破碎效应的脉冲致裂煤体增产实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
YAN Fazhi. Experimental study on pulses induced fracturing and permeability enhancing of coal blocks based on the electrical fragmentation effect[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [14] HAN Ruoyu, WU Jiawei, ZHOU Haibin, et al. Experiments on the characteristics of underwater electrical wire explosions for reservoir

- stimulation[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2020, 5(4): 047201.
- [15] PENG Jianyu, ZHANG Fengpeng, YANG Xiaohui. Dynamic fracture and fragmentation of rock-like materials under column charge blasting using electrical explosion of wires[J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 517–526.
- [16] 李兵磊, 蓝计全, 林国鹏. 基于核磁共振技术的高压电脉冲破碎对岩石孔隙度的影响研究[J]. *现代矿业*, 2020, 36(2): 47–49.
LI Binglei, LAN Jiquan, LIN Guopeng, et al. Study on the effect of high voltage electric pulse breaking on rock porosity based on NMR technology[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(2): 47–49.
- [17] YAN Fazhi, XU Jiang, PENG Shoujian, et al. Effect of capacitance on physicochemical evolution characteristics of bituminous coal treated by high-voltage electric pulses[J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 47–55.
- [18] ZHANG Xiangliang, LIN Baiquan, LI Yanjun, et al. Analysis of fractal dimension of coal subjected to electrical breakdown based on nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020: 103345.
- [19] 赵胤翔, 赵金昌, 马忠忠, 等. 水中高压电脉冲放电致裂不同强度煤体效果研究[J]. *中国矿业*, 2021, 30(10): 175–180.
ZHAO Yinxiao, ZHAO Jinchang, MA Zhongzhong, et al. Research on effect of high-voltage electric pulse discharge in water on cracking different strength coal[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(10): 175–180.
- [20] 李春明, 赵胤翔, 赵金昌, 等. 预制裂纹对水中高压电脉冲致裂煤岩体的影响[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(7): 27–32.
LI Chunming, ZHAO Yinxiao, ZHAO Jinchang, et al. Effect of pre-crack on coal and rock mass induced by high voltage electric pulse in water[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(7): 27–32.
- [21] 祝效华, 罗云旭, 刘伟吉, 等. 等离子体电脉冲钻井并破岩机理的电击穿实验与数值模拟方法[J]. *石油学报*, 2020, 41(9): 1146–1162.
ZHU Xiaohua, LUO Yunxu, LIU Weiji, et al. Electrical breakdown experiment and numerical simulation method of rock-breaking mechanism of plasma electric pulse drilling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(9): 1146–1162.
- [22] 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.
- [23] FU Haijiao, WANG Xiangzeng, ZHANG Lixia, et al. Investigation of the factors that control the development of pore structure in lacustrine shale: A case study of Block X in the Ordos Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2015, 26: 1422–1432.
- [24] AMPATH K H S M, PERERA M S A, LI Dongyin, et al. Characterization of dynamic mechanical alterations of supercritical CO₂ interacted coal through gamma-ray attenuation, ultrasonic and X-ray computed tomography techniques[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 174: 268–280.
- [25] 蒋静宇, 程远平, 张硕. 低阶煤孔隙结构定量表征及瓦斯吸附分散特性[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10): 3221–3233.
JIANG Jingyu, CHENG Yuanping, ZHANG Shuo, et al. Quantitative characterization of pore structure and gas adsorption and diffusion properties of low-rank coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3221–3233.
- [26] ZHANG Xiangliang, LIN Baiquan, YANG Wei, et al. Experimental study on the influence of energy conversion in the process of load coal plasma breakdown[J]. *Energy*, 2021, 218: 119469.
- [27] 章志成, 裴彦良, 刘振, 等. 高压短脉冲作用下岩石击穿特性的实验研究[J]. *高电压技术*, 2012, 38(7): 1719–1725.
ZHANG Zhicheng, PEI Yanliang, LIU Zhen, et al. Experimental research on rock breakdown under short high-voltage pulse[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(7): 1719–1725.
- [28] 张祥良. 等离子体击穿受载煤体的电学响应及致裂增渗机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
ZHANG Xiangliang. Electrical response and mechanism of fracturing and enhanced-permeability of load coals with plasma breakdown[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [29] MARLAND S, MERCAHNT A, ROWSON N. Dielectric properties of coal[J]. *Fuel*, 2001, 80(13): 1839–1849.
- [30] 付荣耀, 孙鹤鸿, 徐旭哲, 等. 静水压力对岩石在等离子体冲击下压裂效果的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2018(5): 1051–1056.
FU Rongyao, SUN Yaohong, XU Xuzhe, et al. Effect of hydrostatic pressure on fracture of rock subjected to plasma impact[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018(5): 1051–1056.
- [31] 张祥良, 林柏泉, 李彦君, 等. 煤体电破碎过程中的电压与电流波形特性[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(6): 1077–1084.
ZHANG Xiangliang, LIN Baiquan, LI Yanjun, et al. Waveform characteristics of voltage and current in coal fracturing process based on electrical fragmentation[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(6): 1077–1084.
- [32] WANG Eric, SHI Fengnian, MANLAPIG Emmy. Pre-weakening of mineral ores by high voltage pulses[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(5): 455–462.
- [33] 谢松彬. 低场核磁共振技术在煤储层物性及吸附性分析中的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
XIE Songbin. Application of low field nuclear magnetic resonance in characterizing the reservoir physical properties and adsorption capacity of coalbed methane reservoir[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [34] LI Song, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Advanced characterization of physical properties of coals with different coal structures by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography[J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 48: 220–227.
- [35] 王志国, 周宏伟, 谢和平. 深部开采上覆层采动裂隙网络演化的分形特征研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2403–2408.
WANG Zhiguo, ZHOU Hongwei, XIE Heping, et al. Research on fractal characterization of mined crack network evolution in overburden rock stratum under deep mining[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2403–2408.
- [36] LI He, LIN Baiquan, HONG Yidou, et al. Assessing the moisture migration during microwave drying of coal using low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Drying Technology*, 2017, 36(5): 567–577.
- [37] 刘红岐. 岩石中离子导电与介电[M]. 北京: 科学出版社, 2015.