



微波弱化煤体微结构损伤特征及能量释放规律分析

马学舟 温颖远 曹安业 郭文豪 周雅静 曹晓杰 刘健男 杨晋州

引用本文：

马学舟, 温颖远, 曹安业, 等. 微波弱化煤体微结构损伤特征及能量释放规律分析[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 233–243.
MA Xuezhou, WEN Yingyuan, CAO Anye. Analysis of microstructure damage characteristics and energy release law of coal weakened by microwave[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 233–243.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023–2019>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击倾向性煤不同损伤程度声发射分形特征研究

Fractal characteristics of acoustic emission in different damage degrees of impact coal
煤炭科学技术. 2021, 49(9): 38–46 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b137ebb9-3dda-4059-b421-ee1fc0746db3>

基于煤样破坏声发射特征的冲击地压评价预警研究

Early-warning evaluation and warning of rock burst using acoustic emission characteristics of coal sample failure
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 116–129 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022–1720>

超声波功率对煤体损伤特性及能量演化规律的试验研究

Experimental study on damage characteristics and energy evolution of coal by ultrasonic power
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 283–294 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022–1596>

冲击倾向性煤岩动静载下破坏机理及声发射特性研究

Study on failure mechanism and acoustic emission characteristics of outburst proneness coal rock under dynamic and static loading
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 57–63 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.006>

不同冲击倾向性煤单轴压缩下能量演化与损伤特征

Energy evolution and damage characteristics of coal with different bursting liability under uniaxial compression
煤炭科学技术. 2021, 49(6): 111–118 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b1356989-ce5b-451c-a90b-d8c5f9180a2b>

不同高径比煤样巴西劈裂声发射特征及能量演化机制研究

Study on acoustic emission characteristics and energy evolution of Brazilian splitting tests of coal samples with different height-diameter ratio
煤炭科学技术. 2024, 52(10): 63–77 <https://doi.org/10.12438/cst.2023–1288>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

马学舟,温颖远,曹安业,等.微波弱化煤体微结构损伤特征及能量释放规律分析[J].煤炭科学技术,2025,53(4):233-243.

MA Xuezhou, WEN Yingyuan, CAO Anye, et al. Analysis of microstructure damage characteristics and energy release law of coal weakened by microwave[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 233-243.

微波弱化煤体微结构损伤特征及能量释放规律分析

马学舟¹,温颖远^{1,2},曹安业^{1,2},郭文豪¹,周雅静¹,曹晓杰¹,刘健男¹,杨晋州³

(1.新疆大学 地质与矿业工程学院,新疆 乌鲁木齐 830000; 2.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116; 3.玛纳斯县天欣煤业有限公司,新疆 昌吉 832200)

摘要:微波辐照技术作为冲击地压防治的新方法被提出,可有效降低煤体物理力学性质。为探究微波辐照对煤体的微结构损伤弱化作用,通过煤样核磁共振、力学试验和声发射监测,评价了孔隙增长对煤样的损伤程度,明确了煤样的能量损伤量与孔隙损伤量呈正比,揭示了煤样的耗散应变能和积聚应变能随孔隙率增加分别上升和下降,提出了微波辐照可促进煤样孔隙发育以降低其冲击破坏的危险性。研究表明:①微波辐照促进煤样小孔和中孔扩展发育后,大孔数量占比增长至8.00%,煤样孔隙率由1.63%增长至3.00%,能量损伤量由0.089增长至0.106,煤样孔隙损伤增量占比煤样能量损伤增量88.24%,阐明了微波辐照煤体的损伤弱化作用受孔隙率增长的影响;②微波后煤样的声发射信号在应力应变曲线上整体前移,峰前的振铃计数由0.48次/s增长至0.58次/s,累计声发射振铃计数增加了105.77%,煤样在裂隙压密阶段和弹性阶段提前发生了破坏;③微波辐照后煤样的声发射能量在裂隙压密阶段、弹性阶段和非稳定破裂发展阶段分别提高60.29%、24.53%和33.79%,而微裂隙稳定破裂发展阶段声发射能量降低38.17%,应力-应变曲线峰前段整体声发射能量大幅增加;④微波辐照后煤样峰前整体积聚的应变能降低67.7%,声发射能量映射的孔隙耗散应变能增长了19.68%,因此煤样受载破坏时释放的残余应变能显著降低,降低了其发生冲击破坏的危险性。

关键词:微波辐照;冲击地压;损伤量;声发射;能量释放

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2025)04-0233-11

Analysis of microstructure damage characteristics and energy release law of coal weakened by microwave

MA Xuezhou¹, WEN Yingyuan^{1,2}, CAO Anye^{1,2}, GUO Wenhao¹, ZHOU Yajing¹, CAO Xiaojie¹, LIU Jiannan¹, YANG Jinzhou³

(1. School of Geology and Mining Engineering Xinjiang University, Urumqi 830000, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Manasi Tianxin Coal Mining Corporation Ltd., Changji 832200, China)

Abstract: Microwave irradiation technology has been proposed as a new method for rock burst prevention and control, which can effectively reduce the physical and mechanical properties of coal. In order to explore the microstructural damage weakening effect of microwave irradiation on coal, through nuclear magnetic resonance, mechanical test and acoustic emission monitoring of coal samples, it is clear that the energy damage amount of coal samples is proportional to the pore damage amount, and it is revealed that the dissipated strain energy and accumulated strain energy of coal samples increase and decrease with the increase of porosity, respectively. It is proposed that microwave irradiation can promote the pore development of coal samples to reduce the risk of impact damage. The results show that: ① microwave irradiation promotes the proportion of large pores to 8.00% after the expansion and development of small and medium pores in coal samples, the porosity of coal samples increases from 1.63% to 3.00%, the amount of energy damage increases from 0.089 to 0.106,

收稿日期:2023-12-28 策划编辑:朱恩光 责任编辑:刘雅清 DOI:10.12438/cst.2023-2019

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52274098);新疆维自治区重点研发任务专项资助项目(2022B01034)

作者简介:马学舟(1997—),男,陕西咸阳人,硕士研究生。E-mail: maxuezhou0209@163.com

通讯作者:温颖远(1986—),男,山东潍坊人,副教授,博士。E-mail: wenyingyuan2010@126.com

and the increment of pore damage of coal samples accounts for 88.24% of the increment of energy damage of coal samples. It is clarified that the damage weakening effect of microwave irradiated coal is affected by the increase of porosity. ② The acoustic emission signal of coal sample moves forward on the stress-strain curve after microwave. The ringing count before the peak increases from 0.48 times/s to 0.58 times/s, and the cumulative acoustic emission ringing count increases by 105.77%. The coal sample was damaged in the fracture compaction stage and the elastic stage in advance. ③ After microwave irradiation, the acoustic emission energy of coal samples increased by 60.29%, 24.53% and 33.79% respectively in the crack compaction stage, elastic stage and unstable fracture development stage, while the acoustic emission energy decreased by 38.17% in the stable fracture development stage of microcracks, and the overall acoustic emission energy in the pre-peak section of stress-strain curve increased significantly. ④ After microwave irradiation, the strain energy accumulated before the peak of the coal sample is reduced by 67.7%, and the pore dissipation strain energy mapped by the acoustic emission energy is increased by 19.68%. Therefore, the residual strain energy released during the loading failure of the coal sample is significantly reduced, which reduces the risk of impact failure.

Key words: microwave irradiation; rock burst; damage amount; acoustic emission; energy release

0 引言

随着我国煤炭资源开采深度和生产强度不断增大^[1],冲击地压作为一种动力灾害现象发生频率和强度也日益增加,制约煤矿安全高效开采^[2]。部分学者基于冲击地压主控因素^[3]及孕灾机制等方面^[4],建立煤岩变形局部化的冲击地压预测方法^[5],提出了降能、释能和阻能的冲击地压防治工程路线^[6],实质上均是降低巷道或采场附近煤岩体应力集中程度和能量积聚程度^[7]。目前煤层注水^[8]、水力压裂、水力割缝^[9]、大直径钻孔卸压、爆破卸压^[10]等煤岩体卸压方法被提出,在现场均取得了良好的卸压效果,能够有效地治理矿井的冲击地压灾害。但是,这些方法在卸压有效性、及时性以及水资源浪费等方面存在局限性或面临环境保护挑战。为解决以上问题,微波破岩技术逐渐被应用到煤炭工业中,其具有清洁、高效和穿透性强等性质,并且岩石蕴含矿物对微波兼容性好、吸收率高等特点^[11]。该技术多应用于硬岩破裂^[12]、煤矸石资源化应用^[13]和煤层气抽采^[14]等方面,近些年在煤炭安全开采领域展开探索,例如,胡国忠等^[15]、WEN等^[16]、HASSANI等^[17]发现微波辐照技术可促进煤体内部形成新的裂纹,有效降低煤体强度,减少煤矿井下开采时动力灾害发生的可能性。

国内外学者对微波弱化裂隙发育后的煤岩体破坏过程中能量演化特征进行了研究,齐消寒等^[18]通过控制微波功率探究煤体物理力学性质变化和破坏变形能量演化特征,发现微波辐照处理煤样物理力学性质总体呈下降趋势,弹性能积聚能量减弱。单鹏飞等^[19]通过分析不同含水率富油煤微波辐照前后煤样物理力学性质,发现微波煤体波速下降,能量积聚和耗散能力进一步减弱。TANG等^[20]通过控制微波辐照时间论证微波作用对防治岩爆灾害的可能性,

发现微波后耗散能占比增加,且基于能量的脆性指数下降。戴俊等^[21]对比分析微波辐照前后玄武岩物理力学性质,发现微波可弱化岩石强度并有效减小岩爆发生烈度。

目前,微波弱化煤岩体技术的研究多集中于孔隙结构演化特征、不同条件下煤岩体受载破裂过程中弹、塑性能等能量演化特征和裂纹形成机理等,但未阐明煤体完全破坏前弹性能量释放特征,缺乏微波后煤样孔隙发育与能量演化对应关系的研究。因此,笔者以微波辐照前后煤样为研究对象,基于核磁共振测定孔隙率,建立评估孔隙发育度的损伤量指标,分析了不同孔隙发育阶段声发射能量特征的影响规律,探究了微波损伤与能量关系,旨在阐明微波辐照后的煤体受压破坏能量聚散演化机理,为微波辐照煤体技术应用于冲击灾害防治合理参数选择提供依据。

1 试验方法

1.1 煤样制备

本文所用煤样为新疆玛纳斯县某煤矿 B₃ 煤,煤块并下保鲜膜封装后 24 h 内送至实验室。由于煤块内含有一定原生裂隙,取心沿着层理断裂严重,圆柱体试件加工极其困难,根据“煤和岩石物理力学性质测定方法”^[22]中的制样标准,如没有条件加工圆柱体试件时,可采用 50 mm×50 mm×100 mm 的方柱体,故煤样尺寸定为 50 mm×50 mm×100 mm 的方柱体试件。

1.2 试验方案

1.2.1 试验设备

本文试验设备主要包括微波设备、核磁共振试验设备和力学试验设备。

微波仪器:采用新航商用微波炉作为微波发生

器(图 1b), 其频率为 2.45 GHz, 功率为 0~2 kW, 可持续稳定对试件进行微波辐照。

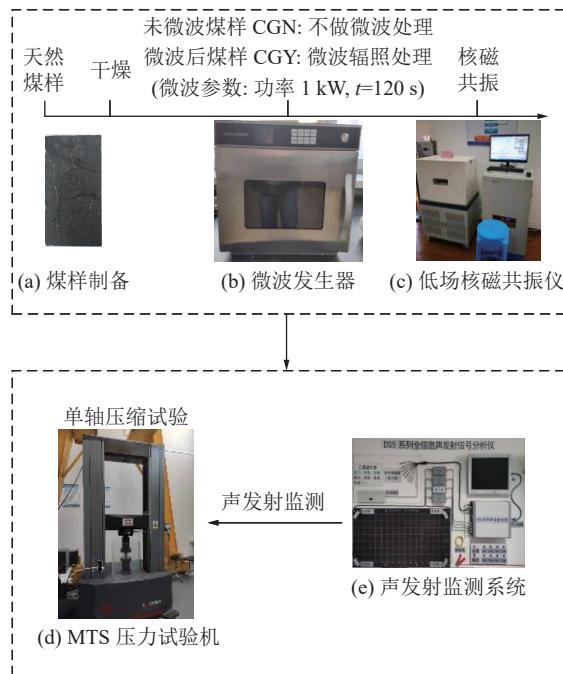


图 1 试验步骤和相应装置

Fig.1 Experimental steps and corresponding devices

核磁共振试验仪器: 采用 MesoMR23-060H 核磁共振分析成像系统(图 1c)。

力学加载试验仪器: 包含力学加载系统、声发射监测系统和高速摄像机 3 部分, 力学加载系统采用美国 MTS 公司生产的 E45.305 静态电液伺服试验机(图 1d)。

声发射监测系统: 采用北京软岛时代科技有限公司生产的 DS5-8A(8 通道)声发射仪主机(图 1e), 可实时采集 AE 瞬态波形, 声发射采集传感器布置如图 2 所示。



图 2 AE 传感器布置

Fig.2 AE sensor layout

1.2.2 试验步骤

为探究微波辐照下煤体破坏能量聚散特征机制

及特点, 分别对微波辐照前后煤样进行力学加载试验, 试验过程如下(图 1):

1) 为避免煤样内水分对微波试验产生影响, 对煤样进行烘干操作。将煤样置于 110 ℃ 真空干燥箱中烘干 24 h 后取出, 放于干燥器内冷却至室温, 后续试验均采用干燥后煤样。

2) 制备微波后煤样和未微波煤样。微波后煤样制备过程为取标准试件置于微波发生器中, 以 1 kW 功率照射 120 s, 为确保每个样品微波辐照效果相同, 均放在微波发生器中的同一位置。未微波煤样作为天然煤样对照组不做微波处理, 将未微波煤样和微波后煤样分别标记为 CGN 和 CGY。

3) 对同一煤样微波前后进行核磁共振检测, 测定微波辐照前后煤样孔隙率, 试验 2 组, 分别标记为 HC1、HC2。

4) 微波后煤样和未微波煤样单轴压缩试验。分别对微波后煤样和未微波煤样进行单轴压缩试验, 煤样加载方式如图 3 所示, 以 0.5 MPa/s 的速度加载直至破坏, 煤样加载过程与声发射监测同步进行。

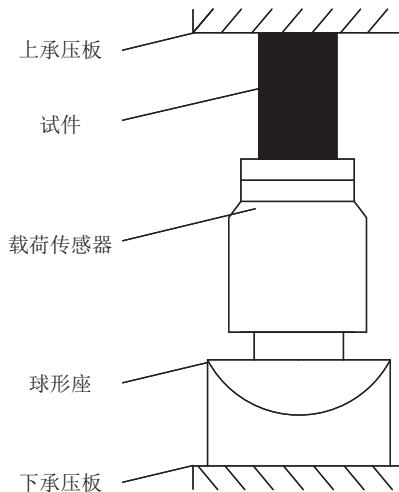


图 3 煤样加载方式

Fig.3 Loading method of coal sample

1.3 核磁共振原理

核磁共振 NMR 测试(Nuclear Magnetic Resonance)可对物体内孔隙孔径和分布进行分析, 通过物体的磁场、外部射频场和材料内部不同结构环境共同作用下的回波衰减信号探测出物体的内部微结构^[23]。

当物体原子核叠加射频场后吸收能量发生能级跃迁现象即为核磁共振, 而脱离射频场作用后, 原子核恢复平衡态的过程称为弛豫^[24], 根据弛豫机理的区别, 将其分为纵向弛豫与横向弛豫。多孔介质中, 主要通过对受限流体的横向弛豫时间(T_2)进行反演

来表征其孔隙结构^[25]。 T_2 与孔隙几何参数间的关系如下:

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

式中: T_2 为横向弛豫时间, ms; ρ_2 为表面弛豫率, $\mu\text{m/s}$; $(S/V)_{\text{孔}}$ 为孔隙的比表面积。

在外部射频场影响下, T_2 时间与物体形态有关, 液态的 T_2 时间高于固态的 T_2 时间。在多孔介质中, 孔径与孔内水的弛豫时间成正比。即弛豫时间曲线峰值的位置与孔径大小相关^[26]。

1.4 微波辐照原理

微波是一种电磁波谱介于红光波和无线电波之间的高频电磁波, 频率范围为 300 MHz ~ 300 GHz, 波长范围为 1 mm ~ 100 cm^[27]。当物料放置于微波场中, 物料内部分子在电磁场作用下发生剧烈热运动, 并与相邻分子摩擦产生热量, 完成从电磁能到热能的转换^[28], 使得物料从内而外被加热, 这个过程中物料热量传递损失较小, 使物料可在很短的时间内达到较高的温度。

微波辐照具有选择性、整体性和高效性的特点, 目前微波辐照技术应用于煤岩体中多利用其选择性的特点, 不同介电性能的岩石材料对微波能量的吸收程度的不同^[29], 据此选择微波辐照对煤岩体进行选择性致裂弱化。

2 试验结果与分析

2.1 微波辐照前后孔隙率变化特征

2.1.1 T_2 图谱分析

核磁共振 T_2 图谱曲线的变化反映了微波前后煤体内孔隙结构的变化, 依据核磁共振 T_2 图谱曲线呈现的不同谱峰可识别微孔和中、大孔这 3 类孔隙类型^[30]。因此, T_2 曲线的峰值高度、峰值位置及峰值间平滑程度分别代表微波前后煤体孔隙的数量、尺度和连通性, 微波辐照前后煤样核磁共振 T_2 图谱曲线如图 4 所示。

根据弛豫时间由小到大可依次识别本次试验中煤样内微孔、中孔和大孔的分布^[31]: 微孔分布于 $T_2=0.01 \sim 1.00$ ms, 峰值位于 0.18 ms 附近; 中孔分布于 $T_2=1 \sim 100$ ms, 峰值位于 11.09 ~ 17.04 ms; 大孔分布于 $T_2=100 \sim 10000$ ms, 峰值位于 222.19 ~ 391.71 ms。同组煤样 T_2 图谱曲线变化趋势大致相同, 其中中孔、大孔对应信号幅度峰值相近, 均低于微孔峰值, 但不同组煤样(微波前后煤样) T_2 曲线峰值有明显变化。相比未微波煤样, 微波后煤样内部

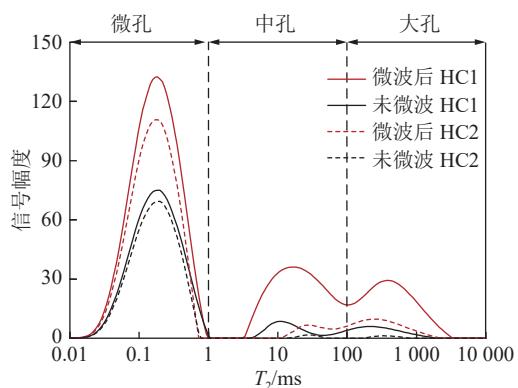


图 4 微波辐照前后煤样 NMR 弛豫时间 T_2 图谱
Fig.4 NMR relaxation time T_2 spectrum of coal samples before and after microwave irradiation

孔隙结构产生变化^[32], 各类孔径的孔隙均有不同程度发育导致信号幅度增大, 其中微孔对应信号幅度峰值增长约 68.41%, 中孔对应信号幅度峰值增长约 521.75%, 大孔对应信号幅度峰值增长约 446.84%。微波辐照后煤样孔隙率分别由 1.63% 增长至 3.00%, 微孔占比由 93.01% 降低至 79.06%, 中孔占比由 4.83% 增长至 12.95%, 大孔占比由 2.16% 增长至 8.00%, 表明微波辐照作用虽使得其内部各类孔径的孔隙均有增加, 但更容易诱导中、大孔发育。 T_2 图谱谱峰间曲线的平稳性可反应孔隙间连通性^[33], 图中微孔、中孔和大孔对应峰值相对独立, 表明微波前后煤体孔隙间连通性较差。

2.1.2 孔隙损伤分析

孔隙结构的变化必然对试样强度造成不同程度的损伤劣化, 考虑孔隙体积变化完全由微波辐照损伤造成, 本文提出煤样孔隙损伤量指标 D_p , 其含义为微波辐照前后孔隙体积变化量与单元体积的比值, 以此对孔隙发育程度进行定量评价, 如式(2)所示:

$$D_p = \frac{V_w - V_t}{V_0} \quad (2)$$

式中: D_p 为微波辐照对煤样孔隙损伤量; V_t 为未微波煤样孔隙体积, mL; V_w 为微波后煤样孔隙体积, mL; V_0 为试样体积, mL。

由核磁共振试验知, 微波前后煤样孔隙体积变化见表 1。将试验所测的孔结构参数分别代入式(2), 可得孔隙损伤量 D_p 为 0.013 和 0.017, 平均孔隙损伤量为 0.015, 说明微波辐照对于煤样存在损伤弱化作用。

2.2 煤样损伤量分析

为表征因孔隙率变化对煤体强度的损伤弱化作用, 根据损伤力学中较为常用的损伤变量定义方法, 结合文献 [34], 可利用弹性性能变化去定义煤样的能量

表 1 微波前后煤样核磁孔隙体积
Table 1 Nuclear magnetic pore volume table of coal samples before and after microwave

样品编号	微波状态	去基底饱和信号量	煤样孔隙体积/mL	试样体积/mL	孔隙率/%	孔隙损伤量 D_p
HC1	微波辐照前	2 227.128	0.40	29.24	1.41	0.017
	微波辐照后	5 131.206	0.90	29.24	3.03	0.017
HC2	微波辐照前	3 022.012	0.54	31.26	1.84	0.013
	微波辐照后	5 218.664	0.93	31.26	2.97	0.013

损伤量,计算方法如式(3)所示:

$$D = U_d/U \quad (3)$$

式中: D 为煤样能量损伤量; U_d 为单轴压缩试验中孔隙压密及孔隙间摩擦消耗的耗散能,J; U 为单轴压缩试验总输入功,J。

单轴压缩全应力-应变曲线根据裂隙的发育过程可分为5个阶段^[35]:裂隙压密阶段、弹性阶段、微裂隙稳定破裂发展阶段、非稳定破裂发展阶段以及峰后阶段。煤样受载荷进入微裂隙稳定破裂发展阶段时,微裂隙的发育使得煤样进一步损伤并释放能量,为避免该阶段能量释放造成微波辐照后煤样的能量损伤量计算误差,本文选取微裂隙破裂前的阶段计算积聚的弹性能。因此,需确定弹性阶段与微裂隙稳定破裂发展阶段的分界点,本文结合声发射振铃数曲线特征进一步划分全应力-应变曲线不同裂隙发育阶段。

单轴压缩全应力-应变曲线峰前阶段,裂隙发育经历压密、起裂、扩展、贯通4个阶段^[36],每个阶段划分都对应着特定的应力阈值,以不同裂隙发育阶段的初始点为特征应力点^[37],分为裂纹闭合应力点 σ_{cc} 、起裂应力点 σ_{ci} 、损伤应力点 σ_{cd} 和峰值应力点 σ_{cf} 。其中,裂纹闭合应力点 σ_{cc} 对应声发射累计振铃数曲线平稳段的起始点;起裂应力点 σ_{ci} 对应声发射累计振铃数曲线平稳段的终点;损伤应力点 σ_{cd} 对应线弹性阶段结束后声发射振铃数明显抬升点^[38-39];峰值应力点 σ_{cf} 通常取应力-应变曲线峰值应力处。

以未微波煤样CGN2为例,结合全应力-应变曲线与声发射振铃数确定其各特征应力点如图5所示。

煤岩体受载破裂过程是一个孤立的封闭系统,该过程中煤样与外界不存在热交换,根据热力学第一定律^[40],试验机对煤样总输入功可表示为

$$U = U_d + U_e \quad (4)$$

式中: U_e 为单轴压缩试验中积聚的弹性能,J。

根据全应力-应变曲线各阶段定义^[35],计算煤样能量损伤量时取起裂应力点 σ_{ci} 前裂隙压密阶段和弹

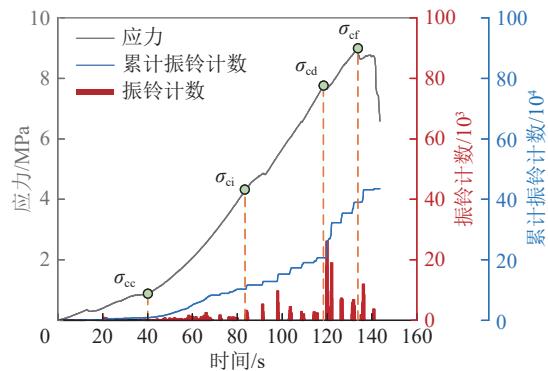
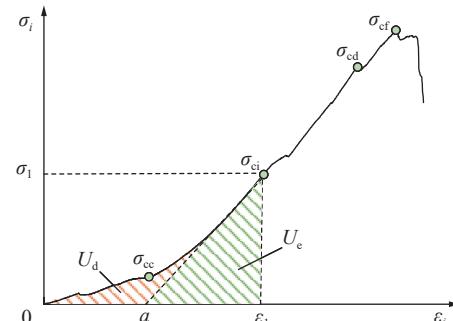


图 5 试样特征应力点示意

Fig.5 Sample characteristic threshold point diagram

性阶段。煤样加载至起裂应力点 σ_{ci} 能量图解法如图6所示,



注: a 点为能量等效的虚拟应变起点。

图 6 起裂应力点时能量图解法

Fig.6 Energy graphic method at crack initiation stress point

单轴压缩试验过程中只有轴向力对煤样做功,则起裂应力点 σ_{ci} 前单轴压缩试验总输入功、弹性能和耗散能分别为

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon \quad (5)$$

$$U_e = \frac{\sigma_1^2}{2E_0} \quad (6)$$

$$U_d = U - U_e \quad (7)$$

式中: ε_1 为煤样加载至起裂应力点 σ_{ci} 所对应的应变值, 10^{-2} ; σ_1 为煤样加载至起裂应力点 σ_{ci} 所对应应力值; E_0 为弹性阶段的弹性模量,GPa。

由式(5)—式(7)可得单轴压缩试验下起裂应力点 σ_{ci} 前的总输入能、弹性能和耗散能,代入式(3)计算微波前后煤样能量损伤量 D_1 和 D_2 ,结果见表2,分别为未微波煤样和微波煤样受载荷前孔隙对煤样的损伤,微波辐照前后煤样的能量损伤增量即为微波辐照后孔隙率增长对于煤样造成的损伤,因此定义煤样损伤增量为

$$D_E = D_2 - D_1 \quad (8)$$

式中: D_E 为煤样损伤增量; D_1 为未微波煤样的能量损伤量; D_2 为微波后煤样的能量损伤量。

表2 微波辐照前后煤样能量损伤量

Table 2 Initial damage amount of coal samples before and after microwave irradiation

样品编号	能量损伤量	平均能量损伤量	煤样损伤增量 D_E
CGN1	0.078		
CGN2	0.089	$D_1: 0.089$	
CGN3	0.099		
CGY1	0.095		0.017
CGY2	0.107	$D_2: 0.106$	
CGY3	0.117		

由表2可知,煤样在微波辐照后其能量损伤量均有增长,未微波煤样能量损伤量为0.078~0.099,平均能量损伤量为0.089;微波后煤样能量损伤量为0.095~0.117,平均能量损伤量为0.106。代入式(8)可得弹性能变化下微波辐照后煤样损伤增量为0.017。

根据2.1.2小节可知微波辐照后平均孔隙损伤量为0.015,与平均煤样损伤增量对比如图7所示。

对比微波辐照前后孔隙损伤量和煤样损伤增量:孔隙损伤量 D_p 与煤样损伤增量 D_E 处于同一数量级,相差较小,其中平均孔隙损伤量占比煤样损伤增量

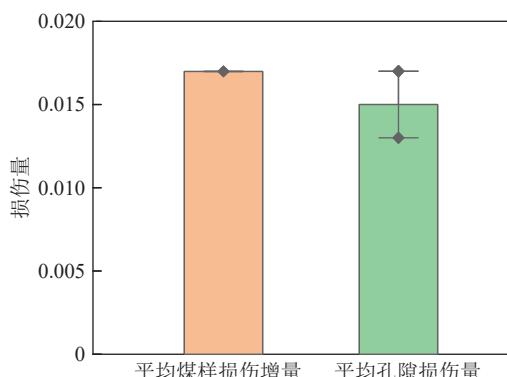


图7 煤样损伤量对比

Fig.7 Comparison chart of coal sample damage amount

88.24%,分析认为微波辐照对于煤体的损伤弱化作用主要受孔隙率增长影响。

2.3 损伤量对能量特征的影响

2.3.1 声发射振铃计数及能量特征

微波辐照后煤样微结构损伤增加,导致煤样受载破坏全过程中的单轴压缩试验总输入功、弹性应变能和塑性耗散能等能量演化特征随之产生变化。

根据中华人民共和国国家标准GB/T 25217.2—2010《冲击地压测定、监测与防治方法第2部分:煤的冲击倾向性分类及指数的测定方法》中冲击能量指数 K_E 定义^[41]:煤试件在单轴压缩状态下,在应力应变全过程曲线中,峰值前积蓄的变形能与峰值后耗损的变形能之比即为冲击能量指数。故单轴压缩过程中能量演化特征可分为峰前能量积聚和峰后能量释放2个部分。而能量释放不仅出现于峰后,峰前能量积聚的过程中孔隙受载闭合和发育也伴随有弹性应变能的耗散释放,本文将峰前段因孔隙耗散释放的弹性应变能定义为耗散应变能。

在微波损伤弱化后,煤体应力-应变曲线峰后段的应力降现象增多,峰前孔隙耗散应变能增加,其整体积聚的应变能降低且得到分级释放,煤样由脆性向塑性转变^[15]。故耗散应变能可作为表征微波损伤弱化煤样程度的指标。

声发射信号可获取煤体内孔裂隙生成时释放的弹性能,因此采用声发射能量定性表征煤样峰前所释放的耗散应变能,为更好地结合声发射事件信息分析煤样破坏过程中能量变化特征,将应力-时间曲线与声发射振铃计数进行归一化处理,并基于孔隙发育的不同阶段,分析各阶段的声发射能量和应变能变化,探究峰前各阶段的积聚应变能和耗散应变能以及残余应变能(积聚应变能-耗散应变能)等能量特征。

微波辐照前后的煤样在单轴压缩作用下应力-时间曲线和特征应力点如图8所示。

相比于未微波煤样,微波辐照后煤样裂隙压密阶段时间增加,弹性阶段和微裂隙稳定破裂发展阶段时间明显降低,非稳定破裂发展阶段时间有降低趋势,各阶段声发射振铃计数均升高。微波辐照前后煤样各阶段时长及声发射振铃计数见表3,其中微波辐照后煤样裂隙压密阶段时长平均增加了15.51%;弹性阶段时长平均减少了23.16%;微裂隙稳定破裂发展阶段时长平均减少了69.69%;非稳定破裂发展阶段时长平均减少了12.26%。

微波辐照后煤样受孔隙损伤影响,微波后煤样

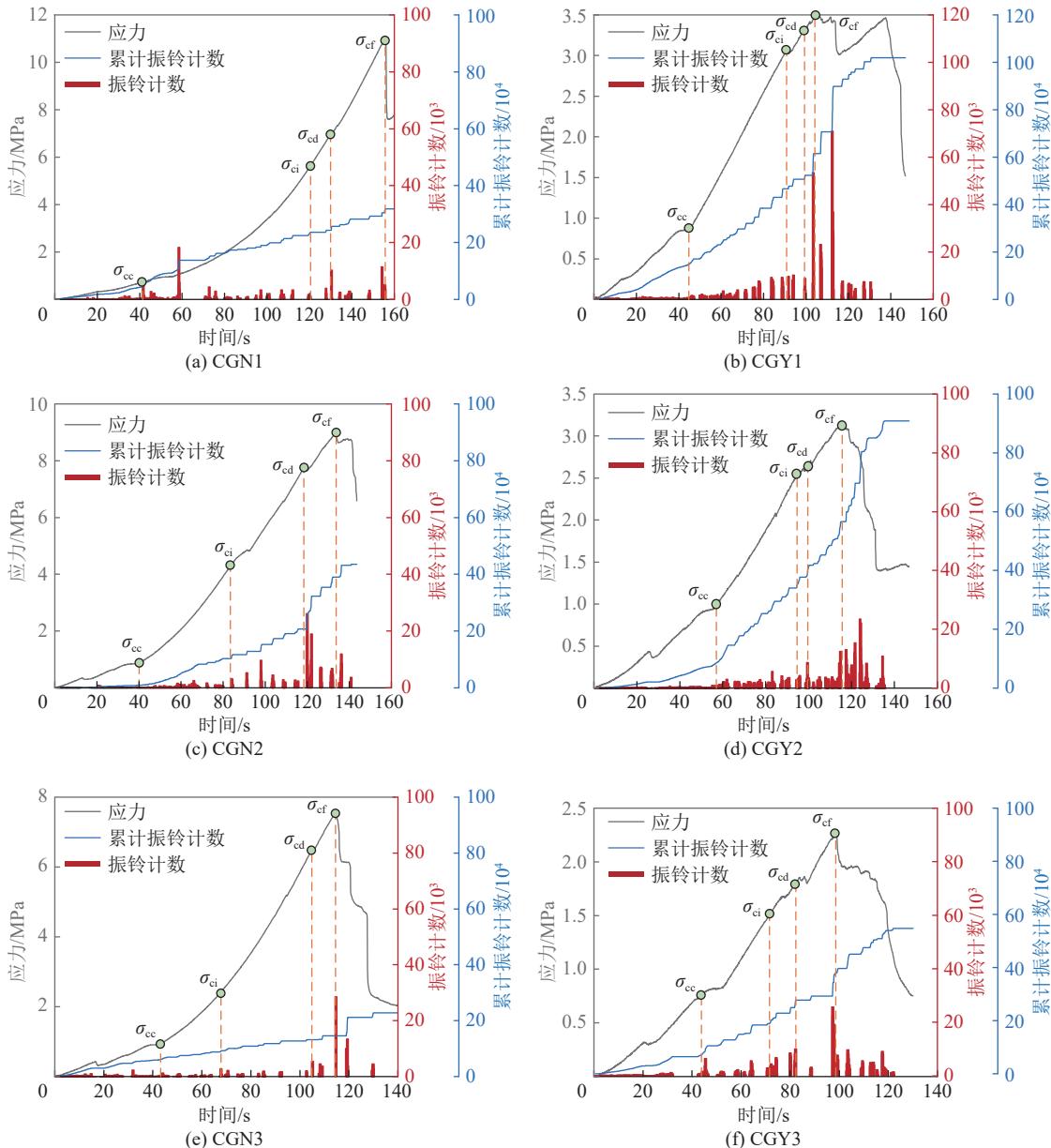


图 8 微波辐照前后煤样不同阶段示意

Fig.8 Schematic diagram of different stages of coal samples before and after microwave irradiation

的声发射信号在应力应变曲线上整体前移,峰前振铃计数单位时间内发生次数由 0.48 次/s 增长至 0.58 次/s,煤样在裂隙压密阶段和弹性阶段提前发生了破坏。累计发射振铃计数平均增长 105.77%,其中裂隙压密阶段声发射振铃数增长 146%,弹性阶段增长 133%,微裂隙稳定破裂发展阶段增长 109%,非稳定破裂发展阶段增长 84%,微波辐照作用对煤样裂隙压密阶段声发射信号影响较大。累计振铃计数曲线由微波前的多次突升转为微波后的平稳上升,表明微波辐照后煤体内微裂隙受载时会均匀破裂并依次贯通。

结合煤样受载荷过程将声发射信号分阶段进行分析,不同阶段微波辐照前后煤样声发射能量特征

变化见表 3。微波后煤样平均声发射能量映射的孔隙耗散应变能增加了 19.68%,除微裂隙稳定破裂发展阶段声发射能量微波辐照作用后存在下降趋势,其余各阶段声发射能量均提高,其中裂隙压密阶段平均声发射能量提高 60.29%,弹性阶段平均声发射能量提高 24.53%,微裂隙稳定破裂发展阶段平均声发射能量降低 38.17%,非稳定破裂发展阶段平均声发射能量提高 33.79%。

2.3.2 微波弱化煤体应变能特征

统计煤样微波辐照前后裂隙压密阶段、弹性阶段、微裂隙稳定破裂发展阶段、非稳定破裂发展阶段对应的积聚应变能(位移×应力)变化如图 9 所示。

表3 微波辐照前后煤样不同阶段时长、声发射振铃计数及能量特征

Table 3 Coal samples before and after microwave irradiation at different stages of time, acoustic emission ringing count and energy characteristic table

阶段	裂隙压密阶段	弹性阶段	微裂隙稳定破裂发展阶段	非稳定破裂发展阶段
时长/s	CGN1	41.49	79.05	9.53
	CGN2	40.06	43.52	34.93
	CGN3	43.19	24.62	37.03
	平均值	41.58	49.06	27.16
	CGY1	45.78	45.19	8.70
	CGY2	54.49	40.17	5.25
	CGY3	43.82	27.74	10.75
	平均值	48.03	37.70	8.23
声发射振铃计数	CGN1	56 555	236 400	256 489
	CGN2	9 548	112 990	207 745
	CGN3	62 724	92 853	119 251
	平均值	42 942	147 414	194 495
	CGY1	163 406	466 608	523 751
	CGY2	75 313	359 247	417 590
	CGY3	77 774	202 745	277 911
	平均值	105 498	342 867	406 417
声发射能量/aJ	CGN1	3.42×10^6	3.91×10^7	6.33×10^6
	CGN2	4.32×10^5	1.28×10^7	2.72×10^7
	CGN3	5.21×10^6	2.22×10^6	2.84×10^6
	平均值	3.02×10^6	1.80×10^7	1.21×10^7
	CGY1	1.04×10^7	3.08×10^7	9.04×10^6
	CGY2	2.53×10^6	3.01×10^7	7.28×10^6
	CGY3	1.62×10^6	6.47×10^6	6.18×10^6
	平均值	4.84×10^6	2.25×10^7	7.50×10^6

微波辐照后煤样除裂隙压密阶段煤样积聚应变能在微波辐照作用下呈上升趋势,其余阶段煤样积聚应变能均有明显下降。其中裂隙压密阶段,微波辐照前后煤样积聚应变能分别为1.68 J和1.98 J,

增幅约17.9%;弹性阶段,微波辐照前后煤样积聚应变能分别为11.73 J和6.12 J,减少了47.8%;微裂隙稳定破裂发展阶段,微波辐照前后煤样积聚应变能分别为15.78 J和2.03 J,减少了87.1%;稳定破裂发展阶段,微波辐照前后煤样积聚应变能分别为11.69 J和3.10 J,减少了73.5%。综合峰前过程而言,随煤样损伤量增加,微波辐照前后其积聚应变能由40.9 J降低至13.2 J,降低了67.7%,整体积聚能量的能力随煤样损伤量增加而降低。

通过上述研究分析可知,微波辐照后煤样在裂隙压密阶段耗散应变能和积聚应变能均略有升高,表明此类煤样在裂隙压密阶段的残余应变能略有增加;弹性阶段和非稳定破裂发展阶段其耗散应变能增加,而积聚应变能降低,表明此类煤样在弹性阶段和非稳定破裂发展阶段残余应变能降低;微裂隙稳

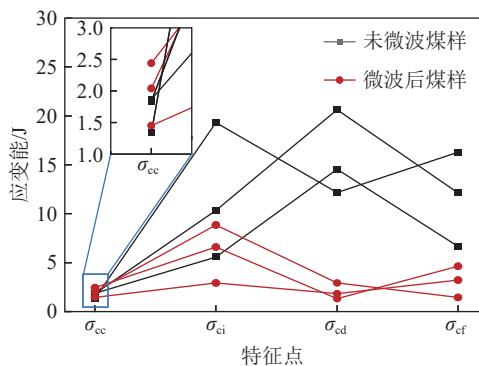


图9 不同阶段微波辐照前后煤样应变能变化曲线
Fig.9 Variation curves of strain energy of coal samples before and after microwave irradiation at different stages

定破裂发展阶段耗散应变能和积聚应变能均降低,但积聚应变能降低程度更大,故此类煤样在微裂隙稳定破裂发展阶段残余应变能降低。

综合微波辐照后煤样各阶段能量特征,其在达到峰值完全破坏前积聚应变能降低,受载破坏时可释放残余应变能降低,其发生冲击破坏的危险性降低。

3 结 论

1)微波辐照煤体的损伤弱化作用受孔隙率增长影响。微波辐照促进煤样小孔和中孔扩展发育后大孔数量占比增长至8.00%,煤样孔隙率由1.63%增长至3.00%,能量损伤量由0.089增长至0.106,煤样孔隙损伤增量占比煤样能量损伤增量88.24%。

2)微波后煤样在裂隙压密阶段和弹性阶段提前发生了破坏。煤样的声发射信号在应力应变曲线上整体前移,峰前的振铃计数由0.48次/s增长至0.58次/s,累计发射振铃计数增加了105.77%。

3)微波辐照后煤样声发射能量增加。受载过程中裂隙压密阶段、弹性阶段和非稳定破裂发展阶段分别提高60.29%、24.53%和33.79%,微裂隙稳定破裂发展阶段声发射能量降低38.17%。

4)微波辐照后煤样受载破坏时释放的残余应变能显著降低,发生冲击破坏的危险性降低。此类峰前整体积聚的应变能降低67.7%,声发射能量映射的孔隙耗散应变能增长了19.68%。

参考文献(References):

- [1] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(1):152-171.
DOU Liming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.
- [2] 姜福兴,张翔,朱斯陶.煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J].煤炭科学技术,2023,51(1):203-213.
JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 203-213.
- [3] 齐庆新,马世志,孙希奎,等.煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构[J].煤炭学报,2023,48(5):1861-1874.
QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861-1874.
- [4] 潘俊峰,康红普,闫耀东,等.顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用[J].煤炭学报,2023,48(2):636-648.
PAN Junfeng, KANG Hongpu, YAN Yaodong, et al. The method, mechanism and application of preventing rock burst by artificial liberation layer of roof[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 636-648.
- [5] 潘一山,宋义敏,朱晨利,等.冲击地压预测的煤岩变形局部化方法[J].煤炭学报,2023,48(1):185-198.
PAN Yishan, SONG Yimin, ZHU Chenli, et al. Localization method of coal rock deformation for rock burst prediction[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 185-198.
- [6] 谭云亮,张修峰,肖自义,等.冲击地压主控因素及孕灾机制[J].煤炭学报,2024,49(1):367-379.
TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Analysis of main control factors of rock burst and disaster mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367-379.
- [7] 张修峰,陈洋.煤柱型冲击地压类型、发生机理与防治对策研究[J].煤炭科学技术,2023,51(10):1-11.
ZHANG Xiufeng, CHEN Yang. Research on the type and occurrence mechanism and prevention of coal pillar rockbursts[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 1-11.
- [8] WEN Y Y, CAO A Y, DING C H, et al. Optimization of destressing parameters of water jet slits in rock burst coal seams for deep mining[J]. Processes, 2023, 11(4): 1056.
- [9] SONG D Z, WANG E Y, LIU Z T, et al. Numerical simulation of rock-burst relief and prevention by water-jet cutting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 318-331.
- [10] 窦林名,阚吉亮,李许伟,等.断顶爆破防治冲击矿压技术体系及效果评价研究[J].煤炭科学技术,2020,48(1):24-32.
DOU Liming, KAN Jiliang, LI Xuwei, et al. Study on prevention technology of rock burst by break-tip blasting and its effect estimation[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 24-32.
- [11] 赵沁华,赵晓豹,郑彦龙,等.微波照射下矿物升温特性与岩石弱化效果研究综述[J].高校地质学报,2020,26(3):350-360.
ZHAO Qinhu, ZHAO Xiaobao, ZHENG Yanlong, et al. A review on mineral heating characteristics and rock weakening effect under microwave irradiation[J]. Geological Journal of China Universities, 2020, 26(3): 350-360.
- [12] 乔兰,郝家旺,李占金,等.基于微波加热技术的硬岩破裂方法探究[J].煤炭学报,2021,46(S1):241-252.
QIAO Lan, HAO Jiawang, LI Zhanjin, et al. Research on the method of hard rock cracking based on microwave heating technology[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 241-252.
- [13] 刘成龙,夏举佩,范辉,等.微波技术在煤矸石资源化应用的研究进展[J].应用化工,2019,48(9):2246-2250.
LIU Chenglong, XIA Jupei, FAN Hui, et al. Research progress on applications of microwave technique in reclamation of coal gangue[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(9): 2246-2250.
- [14] 张永利,刘婷,马玉林,等.微波辐射煤体孔裂隙结构与渗流特性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2022,41(6):481-489.
ZHANG Yongli, LIU Ting, MA Yulin, et al. Coal pore and fissure structure and permeability under microwave radiation[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2022,

- 41(6): 481–489.
- [15] 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.
- [16] WEN Y Y, GUAN W M, ZHAO H C, et al. Modification of coal samples with bursting liability subjected to microwave irradiation[J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021(1): 1867771.
- [17] HASSANI F, SHADI A, RAFEZI H, et al. Energy analysis of the effectiveness of microwave-assisted fragmentation[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 159: 106642.
- [18] 齐消寒,王品,侯双荣,等.不同功率微波预处理煤样增透效果及能量变化研究[J].矿业科学学报,2024,9(1): 66–76.
QI Xiaohan, WANG Pin, HOU Shuangrong, et al. Study on the effect of penetration enhancement and energy change of coal samples pretreated with different microwave powers[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(1): 66–76.
- [19] 单鹏飞,杨攀,来兴平,等.微波-水交互作用下富油煤岩渐进性破坏规律试验[J].岩石力学与工程学报,2023,42(S2): 3884–3896.
SHAN Pengfei, YANG Pan, LAI Xingping, et al. Experiment on progressive failure law of tar-rich coal under microwave-water interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S2): 3884–3896.
- [20] TANG M Y, GAO M Z, LI S W, et al. Failure behavior and energy evolution characteristics of deep roadway sandstone under different microwave irradiation modes[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(1): 214–226.
- [21] 戴俊,李栋硕,宋四达.微波照射方式对玄武岩损伤特性影响研究[J].煤炭技术,2018,37(8): 311–314.
DAI Jun, LI Dongshuo, SONG Sida. Study on basalt damage characteristics due to microwave irradiation method[J]. Coal Technology, 2018, 37(8): 311–314.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.煤和岩石物理力学性质测定方法 第7部分:单轴抗压强度测定及软化系数计算方法:GB/T 23561.7—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [23] 祖栋林.核磁共振成像学[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [24] TZIOTZIOU M, KARAKOSTA E, KARATASIOS I, et al. Application of ¹H NMR to hydration and porosity studies of lime–pozzolan mixtures[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2011, 139(1–3): 16–24.
- [25] 刘堂晏,肖立志,傅容珊,等.球管孔隙模型的核磁共振(NMR)弛豫特征及应用[J].*地球物理学报*,2004,47(4): 663–671.
LIU Tangyan, XIAO Lizhi, FU Rongshan, et al. Applications and characterization of nmr relation derived from sphere-capillary model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(4): 663–671.
- [26] 齐琦.微波辐照下含水率对煤体孔隙特性的影响机理[D].乌鲁木齐:新疆大学,2021.
QI Qi. Influence mechanism of moisture content on pore characteristics of coal under microwave irradiation[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021.
- [27] 司垒,李嘉豪,邢峰,等.不同煤矸混合物的微波传播特性试验研究[J].煤炭科学技术,2023,51(5): 219–231.
SI Lei, LI Jiaho, XING Feng, et al. Experimental study on microwave propagation characteristics of different coal-gangue mixtures[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 219–231.
- [28] 孙娜娜,孙会娜,沈莉莎,等.磁性纳米颗粒-微波辐射对稠油O/W乳状液的协同破乳[J].化工进展,2022,41(6): 3127–3137.
SUN Nana, SUN Huina, SHEN Lisha, et al. Synergistic demulsification of magnetic nanoparticle-microwave on heavy oil O/W emulsion[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(6): 3127–3137.
- [29] 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.
ZHU Jian, HU Guozhong, XU Jialin, et al. [J]. The 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.
- [30] 郑贵强,凌标灿,郑德庆,等.核磁共振实验技术在煤孔径分析中的应用[J].*华北科技大学学报*,2014,11(4): 1–7.
ZHENG Guiqiang, LING Biaocan, ZHENG Deqing, et al. The application of nuclear magnetic resonance on analyzing aperture in coal[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2014, 11(4): 1–7.
- [31] 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]. *Scientia Sinica (Terra)*, 2010, 40(11): 1598–1607.
- [32] 林柏泉,钟玉婷,曹轩,等.循环微波辐射下煤体孔裂隙结构演化特征[J].*西安科技大学学报*,2021,41(6): 964–972.
LIN Baiquan, ZHONG Yuting, CAO Xuan, et al. Effect of cyclic microwave irradiation on pore and fracture evolutions of coal[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(6): 964–972.
- [33] 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.
- [34] HUANG P, ZHANG J X, JEAN DAMASCENE N, et al. A fractional order viscoelastic-plastic creep model for coal sample considering initial damage accumulation[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60(4): 3921–3930.
- [35] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(2): 222–233.
- [36] 高美奔,李天斌,孟陆波,等.岩石变形破坏各阶段强度特征值

- 确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 3577–3588.
GAO Meiben, LI Tianbin, MENG Lubo, et al. The method to identify characteristic stresses of rock in different stages during failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3577–3588.
- [37] 肖桃李, 袁浩, 折海成, 等. 单轴压缩条件下类大理岩裂纹起裂特性与扩展规律[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(8): 161–171.
XIAO Taoli, YUAN Hao, ZHE Haicheng, et al. Crack initiation characteristics and propagation law of marble-like rock under uniaxial compression[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(8): 161–171.
- [38] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 785–812.
- [39] 付文姜, 杨建明. 高温热损伤后花岗岩声发射及特征能量研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(8): 120–126.
FU Wenjiang, YANG Jianming. Study on acoustic emission and characteristic energy of granite after high-temperature thermal damage[J]. MINING R&D, 2023, 43(8): 120–126.
- [40] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003–3010.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003–3010.
- [41] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 冲击地压测定、监测与防治方法 第2部分: 煤的冲击倾向性分类及指数的测定方法: GB/T 25217.2—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.