

• 深地科学与工程 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202300932



本刊网刊

## 循环加卸载作用下水浸煤体渐进损伤机理试验研究

王方田<sup>1,2</sup>, 汤天阔<sup>1</sup>, 张村<sup>3\*</sup>, 窦凤金<sup>4</sup>, 魏学谦<sup>1</sup>, 孙暖<sup>1</sup>, 成家章<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116;  
3. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 4. 神东煤炭集团 锦界煤矿, 陕西 榆林 719319)

**摘要:**煤矿地下水库技术已成为实现矿井水资源保护与利用的有效途径。在应力与水浸作用下,煤柱坝体强度劣化效应将直接影响地下水库工程的稳定性。基于此,开展不同含水状态煤样循环加卸载试验,利用声发射设备监测试验中煤样的损伤特征,并采用核磁共振(NMR)设备检测煤样孔隙发育,揭示不同含水状态及循环应力下煤体渐进损伤演化机理。结果表明:不同含水状态煤样随循环级数的增加,声发射信号逐渐增加,裂隙发育程度逐渐加大;循环应力作用下煤体的损伤破坏主要发生在首次达到每级峰值荷载时,随后仅发生小幅度损伤。水岩作用对声发射具有弱化效应,含水煤样在循环应力作用下易发生应力突变,对煤体造成瞬时损伤破坏,且随含水程度的增加,突变次数也有所增加。在3级循环加卸载后,各级干燥煤样的 $T_2$ 曲线幅值相较于未循环加卸载煤样均增大,干燥煤样孔隙数量随循环级数的增加而增多;自然和饱和煤样在前两级循环加卸载后 $T_2$ 曲线幅值增加,曲线范围变宽并向右半部分偏移,煤样孔隙数量增加,第Ⅲ级循环加卸载后,中微孔数量降低幅度较大,大孔数量均有小幅增长,煤样总体孔隙数量降低。含水煤体随着循环应力的增大,煤体的孔隙变化呈现低幅的增大—降低—增大的趋势,水浸煤体在应力作用下孔隙变化加剧,更易产生大孔隙结构,造成煤体累积损伤破坏。Ⅰ、Ⅱ级循环加卸载后,各煤样的孔隙度上升,Ⅲ级循环后干燥煤样孔隙度上升,自然与饱和煤样孔隙度下降。Ⅲ级循环加卸载后,干燥煤样的抗压强度为14.27 MPa,较未进行循环加卸载时的平均值降低了9.85%;饱和煤样的抗压强度为8.49 MPa,较未进行循环加卸载时的平均值降低了24.87%;煤样的强度随含水程度及循环级数的增加而降低。

**关键词:**煤柱;水浸煤体;循环加卸载;孔隙变化;渐进损伤

**中图分类号:** TU315

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2025)04-0089-14

黄河流经的青甘宁等9省区,煤炭储量占全国75%,是中国煤炭生产潜力最大的区域。黄河流域以全国2%的水资源支撑了12%的人口、15%的耕地和沿河50多座大中城市的供水任务。水资源是支撑煤炭资源开发和生态环境协调发展的基础资源,也是当前黄河流域经济发展和生态环境保护之间最突出的矛盾。煤炭开采引起的水资源破坏、生态环境脆弱等问题严重制约了煤炭工业的发展,水资源保护问题已成为业界关注的重点<sup>[1-5]</sup>。以顾大钊院士为代表的科研团队创造性地提出了煤矿地下水库技术,为实现矿井水资源化利用、促进生态环境保护、破解生态脆弱矿区煤炭资源开发与水资源保护利用的矛盾以及保障能源安

全和生态文明建设提供了有效途径。目前,煤矿地下水库技术已在神东多个矿区成功推广应用,累计建成30余座地下水库,年供水量近 $7 \times 10^7 \text{ m}^3$ <sup>[6-9]</sup>。技术进步的同时亟待建立和完善煤矿地下水库矿井水保护理论,其中煤柱坝体的稳定是地下水库安全运行的关键。煤柱坝体除了受到地应力作用外,还会受到各种采动应力的长期反复作用,容易产生疲劳损伤变形。如采用大型机械开掘巷道、煤层打孔注水增透等施工作业都会对附近煤层造成应力扰动,而这种扰动可以简化为对煤岩的循环加卸载过程。同时,煤矿地下水库在蓄水前、中、后期煤柱坝体的含水状态不同,受到采动应力长期反复作用的影响也不同<sup>[10-12]</sup>。因此,研

收稿日期:2023-11-20 修回日期:2024-04-05 网络出版日期:2024-06-11

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52474151;52474161);中国矿业大学研究生创新计划项目(2025WLKXJ031);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX25\_2803)

作者简介:王方田(1985—),男,教授,博士。研究方向:采矿岩石力学及煤系资源智能绿色开发。E-mail: wangfangtian111@163.com

\*通信作者:张村,副教授,E-mail: cumt\_zc@163.com

究不同含水状态下煤样在循环加卸载作用下的变形及力学特征有助于进一步认识煤柱坝体的破坏机制,同时对煤矿地下水库安全高效运行起到指导作用。

国内外学者对煤岩在水浸环境下受应力损伤的破坏机理开展了研究。来兴平等<sup>[13]</sup>进行了不同含水状态下煤岩样的单轴压缩试验,发现水的参与可放缓煤样损伤发展过程而使煤样冲击倾向性得到弱化,但较高含水率将使岩样的损伤演化过程加剧。王云刚等<sup>[14]</sup>测试了不同含水状态下煤样超声波信号并进行频谱分析,发现煤样吸水后其主频率值降低使得能量多聚集于低频区间。Ai等<sup>[15]</sup>研究了水浸作用下煤样的孔裂隙变化情况,发现随着水浸时间的增长,试样的矿物成分发生变化,孔隙连通性和渗透性增大,平均孔隙尺寸扩大并形成新的孔隙,孔隙类型从微孔变成中孔再到大孔。张村等<sup>[16]</sup>分析了水浸前后孔裂隙、矿物成分的演化特征,发现煤样中矿物成分溶于水将导致孔隙率增加,而部分矿物成分润湿膨胀后扩散吸附至裂隙表面致使大孔径裂隙占比减小。王凯等<sup>[17]</sup>分析了不同含水状态下的原煤及型煤的破坏形式,发现随含水率增加,煤样的压密段增大,弹性段减小。Wang等<sup>[18]</sup>探究了水浸与应力作用下采空区煤柱的累积损伤机理,为采空区煤柱参数优化设计提供了依据。李波波等<sup>[19-20]</sup>通过开展不同含水状态煤样在3向应力下的渗流试验,发现煤岩部分力学特征指标降低,煤样渗透率在恒定孔压下随含水率增大而减小。胡国忠等<sup>[21]</sup>利用NMR设备分析了微波辐射后各含水状态煤样内部孔裂隙结构变化特征,发现随着含水量的增大,煤体的孔隙数量和渗透性在微波辐射后先减小后增大。

Royer-Carfagni等<sup>[22]</sup>发现反复的循环会削弱岩石材料的强度(约30%~50%)。吴宝杨等<sup>[23]</sup>探究了不同循环浸水条件下裂隙岩体的损伤特征,发现随着浸水次数增加,砂岩单轴抗压强度和弹性模量减小。王方田等<sup>[24]</sup>开展循环加卸载试验并结合声发射技术发现损伤煤样在再次受载时其裂隙拓展程度在峰值破坏前下降而在峰值破坏瞬间剧增。Cerfontaine等<sup>[25]</sup>研究发现循环载荷会导致岩石塑性变形和循环损伤的累积,在等幅循环加载下,即使循环峰值载荷低于其单轴抗压强度也会造成岩石强度的降低。Yang等<sup>[26]</sup>研究了循环载荷作用下煤样的强度、变形、能量耗散和疲劳损伤,发现煤比其他较硬的岩石更易产生疲劳损伤破坏。Lv等<sup>[27]</sup>通过不同围压下煤样的多级循环加载试验,研究了煤样的疲劳强度和破坏特性,发现长期的循环加卸载试验会使煤样产生更多的小裂纹。叶平等<sup>[28]</sup>开展了孔隙压力循环加卸载下煤岩的变形及渗流试验,发现相同孔隙压力下,随着循环次数增大,煤

岩渗透率呈减小趋势。刘永茜<sup>[29]</sup>开展了煤体三轴循环变载气体渗流试验,发现3次循环加卸载试验导致煤体孔隙结构发生显著变化,微孔体积增加是煤体渗透率劣化的重要标志之一。

水的存在会使煤岩体发生水岩作用,同时水及循环加卸载均会使煤岩体物理力学参数及孔隙结构产生变化,不同含水状态及循环加卸载情况下煤样所受到的弱化效果各不相同。

综上,国内外研究很好地揭示了循环加卸载或者水岩作用对煤体力学及孔隙特性的影响,但在上述研究中仅考虑了循环载荷或者水浸作用单一因素影响,没有综合考虑矿井地下水库煤柱坝体循环受载与水浸耦合作用情况。基于此,本文分别制作干燥、自然、饱和3种含水状态的圆柱形标准试样,进行单轴分级循环加卸载试验,并考虑实际工程中采动应力的长期作用,增加每级荷载循环次数,以分析在多次循环荷载下煤岩疲劳损伤的完整过程。通过分析循环荷载作用下不同含水煤样的声发射特征及孔隙演化规律,探讨在分级循环荷载条件下不同含水状态煤样的损伤破坏机制。

## 1 试验

### 1.1 试样制备

试验煤样均取自神东矿区的31411工作面。31411工作面所采煤层为3<sup>-1</sup>煤,煤的容重为1.29 t/m<sup>3</sup>,煤层平均厚3.19 m。煤样采集点的工程地质概况如图1所示

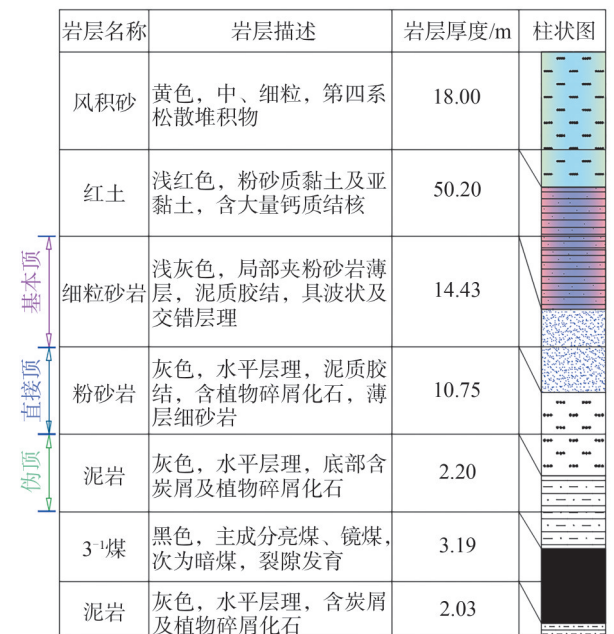


图1 31411工作面覆岩钻孔综合柱状图

Fig. 1 Comprehensive bar chart of overburden drill holes at workface 31411

示。在井下工作面的煤壁上选择完整的、未被风化的煤块,加工成尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times h 100\text{ mm}$ 的标准原煤样品。煤样在钻探、切割和研磨的各个阶段都容易被破碎,煤样制备过程中的机械干扰会影响煤样的原始特性,应尽量降低机器的速度及震动,减少机器的晃动。

### 1.2 试验方案

试验利用真空加压饱水装置、电热恒温鼓风干燥箱将采集的无损煤样制备成干燥、饱和含水状态的煤样。在运输加工过程中,煤样的水分会发生改变,将制备的饱和煤样在自然环境下干燥24 h作为自然煤样。采用MTS815.04岩石力学测试系统作为加载设备,同步应用PCI-II声发射测试系统,设定阈值值为40 dB,前置增益为40 dB,采样频率为1 MHz,声发射传感器类型为RT50-AE,测试煤样在加卸载过程中的声发射信号;加卸载试验后,利用纽迈公司低温高压核磁设备测试煤样的孔隙分布特征。试样制备及试验仪器如图2所示,测得饱和煤样的平均含水率为7.52%,自然煤样的平均含水率为3.31%。整体试验设计方案如图3所示。

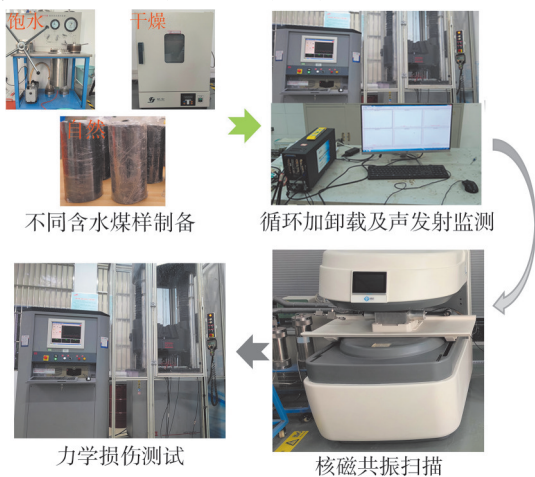


图2 试样制备及试验仪器

Fig. 2 Sample preparation and experimental instruments

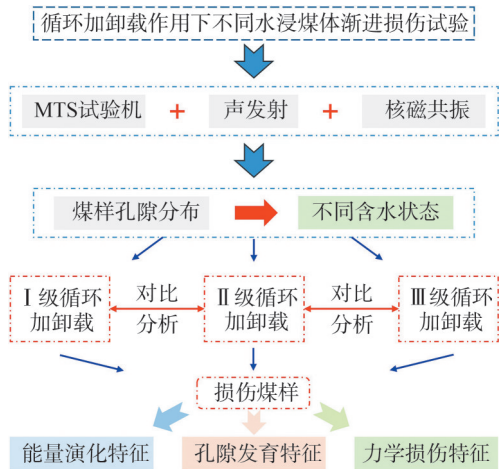


图3 试验设计方案

Fig. 3 Experimental design plan

### 1.3 预试验与试验加载方式

在正式试验开始前,通过预加载试验测得干燥、自然、饱和3种含水状态下煤样的平均抗压强度,用来选择循环加卸载试验合适的循环荷载。预加载试验设置加载速率为0.2 mm/s,当试件发生破坏时停止加载。不同含水状态煤样的荷载位移曲线如图4所示,测得不同含水状态煤样强度参数见表1。

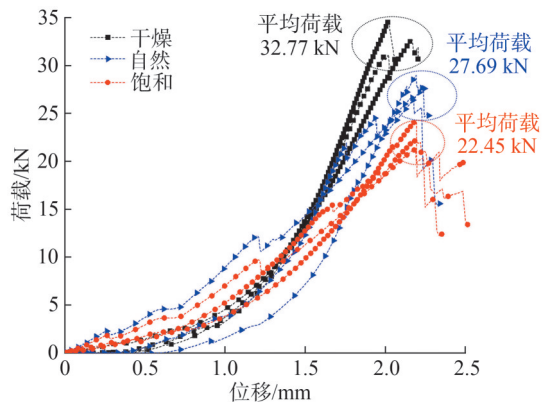


图4 不同含水状态煤样的荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of coal samples with different water content states

表1 不同含水状态煤样强度参数

Tab. 1 Strength parameters of coal samples in different water-bearing states

含水状态	试件编号	最大荷载/kN	抗压强度/MPa	最大荷载平均值/kN	平均抗压强度/MPa
干燥	1	32.66	16.64	32.77	16.70
	2	34.60	17.63		
	3	31.07	15.83		
自然	1	27.53	14.03	27.69	14.11
	2	26.55	13.53		
	3	29.01	14.78		
饱和	1	21.16	10.78	22.45	11.44
	2	24.04	12.25		
	3	22.17	11.30		

由表1可知,相较于干燥煤样,饱和煤样最大荷载平均值降低了31.49%,水使煤样的强度参数发生了劣化。

基于不同含水状态下煤样的单轴抗压强度,为规避力学离散性特征且便于在分级循环后对煤样进行核磁共振探测其内部的孔隙演化情况,需在循环加卸载试验后保持煤样的完整性。因此将试验加卸载峰值荷载设置为自然含水煤样极限破坏荷载的50%左右(即在 $\sigma=R_c/2$ 附近,其中, $\sigma$ 为试验加卸载峰值荷载, $R_c$ 为自然含水煤样极限破坏荷载)。由表1可得,单次直

接加载条件下自然含水状态煤样最大荷载平均值为 27.69 kN, 因此将分级循环加卸载的峰值荷载设置为 14 kN, 故设计荷载等级增量为:

$$\Delta P = \frac{P_w}{r_{\min}} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  为循环等级的荷载增量, kN/级;  $P_w$  为含水状态下煤样平均最大荷载减去试验初始荷载, kN;  $r_{\min}$  为循环级数的最小值, 取 3。计算取整得等级荷载增量  $\Delta P$  为 4 kN/级。

对煤样分别进行变下限梯级单轴循环加卸载, 采用力控制, 正弦波加载, 相位  $270^\circ$ , 频率为 0.1 Hz, 幅值为 5 MPa; 第 1 等级荷载上下限分别为 2、6 kN (为防止试验过程中试样发生松动), 其后每个等级荷载增量均设为 4 kN/级, 即第  $i$  级循环的荷载下限为第  $i-1$  级循环的荷载上限, 荷载上限是基于第  $i-1$  级循环荷载上限增加 4 kN, 如图 5 所示。

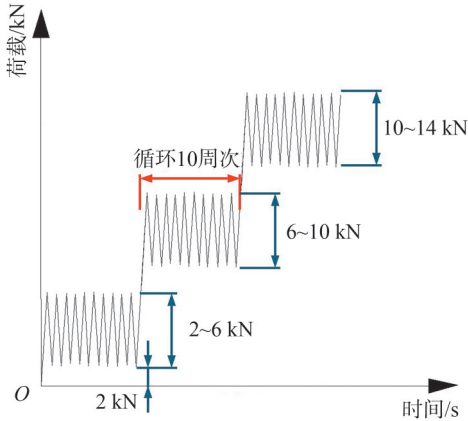


图 5 循环加卸载方式

Fig. 5 Cyclic loading-unloading methods

图 5 中, 将每个等级荷载的循环次数均设置为 10, 以此类推, 直至试件加载至煤样平均荷载上限为 14 kN。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 不同含水状态煤样循环加卸载声发射特征

#### 2.1.1 干燥煤样

根据第 1 节的试验设计进行干燥煤样的 3 级循环加卸载试验, 循环加卸载及声发射监测结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 在 3 级循环加卸载期间, 随加卸载级数的增加, 干燥煤样声发射振铃计数及能量均呈现梯形增加。

在单级循环加卸载过程中, 煤样的振铃计数及能量增长主要发生在首次循环加载阶段, 首次循环卸载后, 声发射信号先逐渐下降, 随后随循环的进行在低值区间波动。在 I 级循环加卸载阶段, 施加荷载较小,

煤样内部原有的微观裂隙在外力作用下逐步闭合, 矿物接触程度提高, 闭合裂纹表面之间的滑移引起了少量的声发射, 此时声发射振铃计数及释放能量较低, 峰值分别为 252 次、907 mV· $\mu$ s。在 II 级循环加卸载阶段, 随着应力的增加, 该阶段振铃计数及能量相比 I 级循环加卸载阶段有所增加, 峰值振铃计数为 413 次, 增长了 63.8%; 峰值能量为 1 396 mV· $\mu$ s, 增长了 53.9%。III 级循环加卸载后, 煤样内部裂隙稳定扩展, 新的裂隙不断产生, 裂隙的产生和扩展使得声发射振铃计数和能量进一步增加, 振铃计数峰值为 709 次, 较上一级增长了 71.7%; 峰值能量为 2 762 mV· $\mu$ s, 较上一级增长了 97.8%; 循环加卸载 3 次时, 煤样的声发射计数及能量有了较大幅度的增加, 裂隙是岩体强度的决定因素, 在此阶段, 煤样内部微裂隙不断产生和发展, 对煤样造成了损伤。

#### 2.1.2 自然状态煤样

相较于干燥煤样, 煤样在自然含水状态下的力学参数会产生弱化。将保存完好的自然含水状态煤样从保鲜膜中取出, 进行循环加卸载试验, 并利用声发射设备对煤样损伤程度进行监测, 循环加卸载及声发射监测结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出: 自然煤样的振铃计数与能量变化与干燥煤样类似, 均呈现阶梯型增加, 且上升幅度随循环加卸载级数的增加而逐级增加; 自然煤样的声发射信号振铃计数和能量峰值较于干燥煤样均有所降低。

III 级循环加卸载的振铃计数和能量峰值分别为 552 次、1 982 mV· $\mu$ s, 相较于干燥煤样, 分别降低了 22.1%、28.2%。这是由于煤样浸水后, 水对煤样的孔隙水压力作用和应力腐蚀作用使内部裂隙发生了劣化, 从而减少了声发射计数和能量。微裂隙表面的结合水膜不仅降低了矿物表面的摩擦系数, 还会产生孔隙水压力, 抵消一部分作用于岩石内部任意截面的总应力, 水对煤样的多重作用影响使声发射计数和能量降低。

由图 7(c) 可知, 自然含水状态煤样在第 III 级循环的 3 253 s 信号突变, 振铃计数和能量产生了大幅提高, 煤样内部微裂隙在第 III 级循环加卸载过程中进一步拓展, 煤样的损伤程度增大。

#### 2.1.3 饱和含水状态煤样

由预试验可知, 饱和含水煤样的强度较自然含水煤样进一步弱化, 饱和含水煤样的声发射特征如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 饱和含水状态煤样 I 级和 II 级循环加卸载声发射特征与自然含水状态煤样具有一致性。

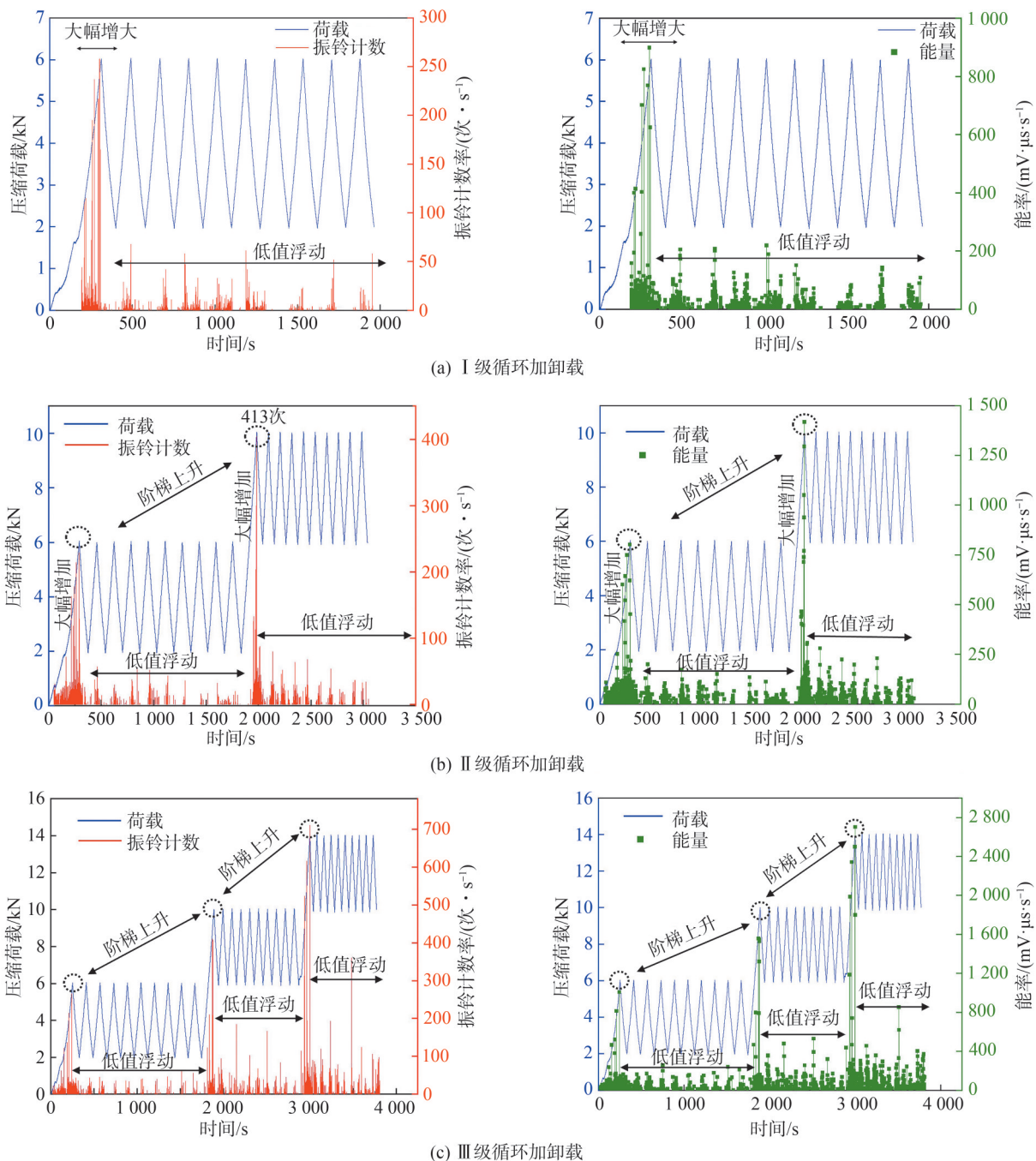


图 6 干燥煤样循环加卸载声发射特征

Fig. 6 AE characteristics of dry and hydrated coal samples under cyclic loading and unloading

饱和煤样在第Ⅲ级首次循环中,声发射振铃计数和能量峰值为572次、1 936 mV·μs,较自然含水煤样未发生较大变化。饱水煤样在第Ⅲ级循环时产生了较大程度的突变,由图8(c)可以看出:在第Ⅲ级循环阶段的第3 274、3 452、3 774 s发生了声发射的信号突变,信号突变的次数增多且在第3 452 s突变的幅度更大,峰值超过了第Ⅲ级首次循环加卸载的峰值;饱和含水状态下的煤样在第Ⅲ级循环加卸载中的内部累积损伤效应更加明显,可以看到水使煤样内部的胶结

弱化,在较低应力水平下,煤样内部有大量的微破裂事件发生,能量积聚的过程中伴随能量的释放与转化,煤样内部裂纹充分扩展,煤样的循环应力损伤效应加剧。

在受到循环应力作用时,煤体的损伤破坏主要发生在每级循环加卸载过程中首次达到该级峰值荷载时,随后仅发生小幅度的损伤。含水煤样在高应力环境中受循环应力作用时,在累积应力作用下易发生应力突变,对煤体造成瞬时损伤破坏;且随含水程度的

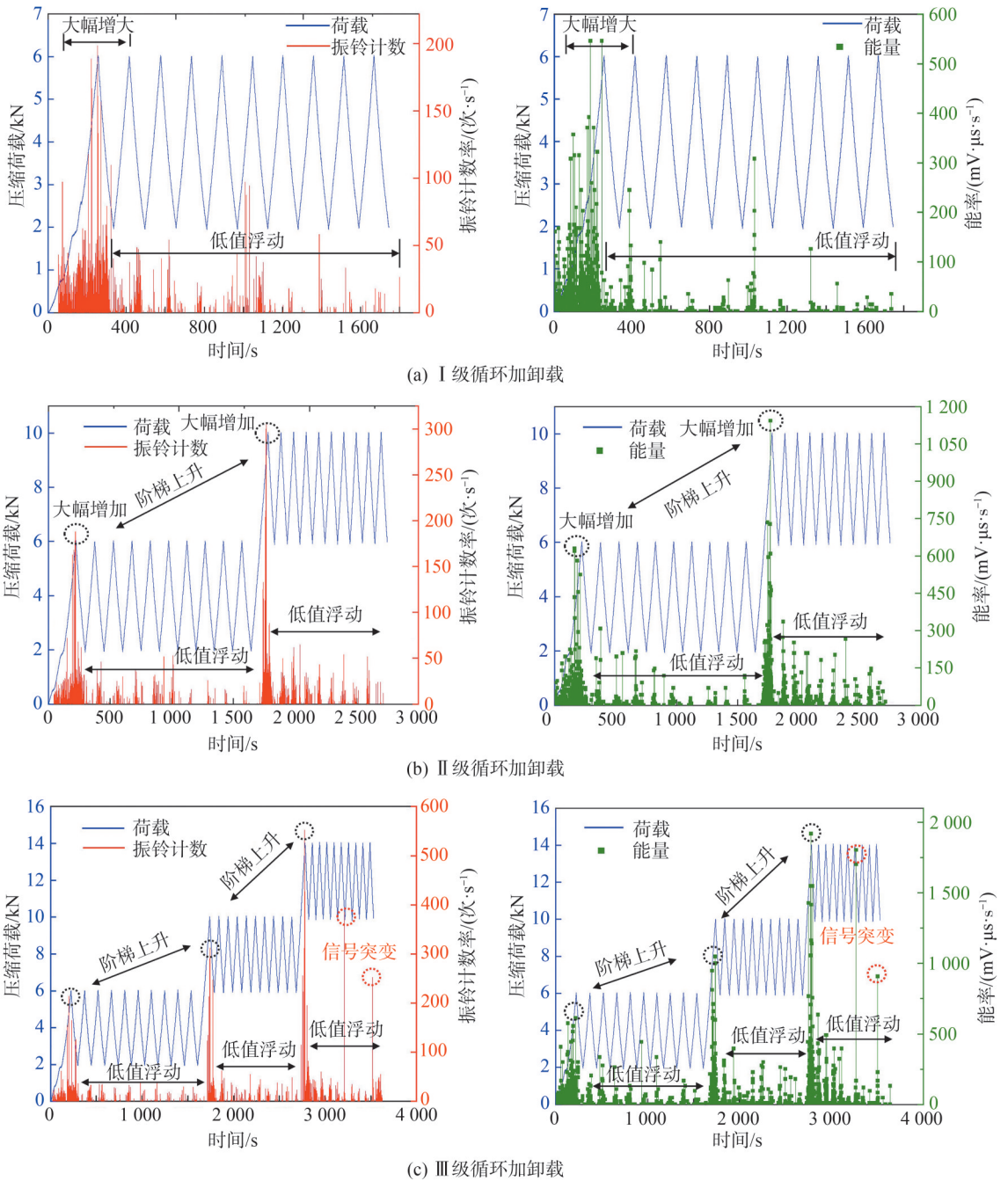


图7 自然含水煤样循环加卸载声发射特征

Fig. 7 AE characteristics of natural water-containing coal samples under cyclic loading and unloading

增加,突变次数也有所增加。

综合以上对干燥煤样、自然状态下的煤样、饱和含水状态下的煤样的循环加卸载声发射特征的分析,可以得出以下结论。

1)同一含水状态下,煤样声发射振铃计数和能量与应力变化的响应具有相似性。振铃计数与能量随循环等级的增加呈台阶式增加,其中,在每级循环的首次加载阶段,振铃计数的增量普遍较大,随后逐渐下降,并在后续循环中保持低幅度波动。

2)不同含水状态下,煤样声发射振铃计数和能量

随应力的变化规律具有差异性。自然含水状态下的煤样和饱和含水状态下煤样的振铃计数和能量与干燥煤样相比有所降低,水分子的存在对声发射信号具有弱化效应。

在相同荷载下,饱和含水状态下煤样的损伤程度更高,导致内部的微裂隙发育更多,进而产生了较多声发射信号,抵消了一部分水对声发射信号的弱化效应。自然含水状态下的煤样与饱和含水状态下的煤样在第III级循环加卸载时均受到了进一步的损伤破坏,饱和煤样破坏程度更高。

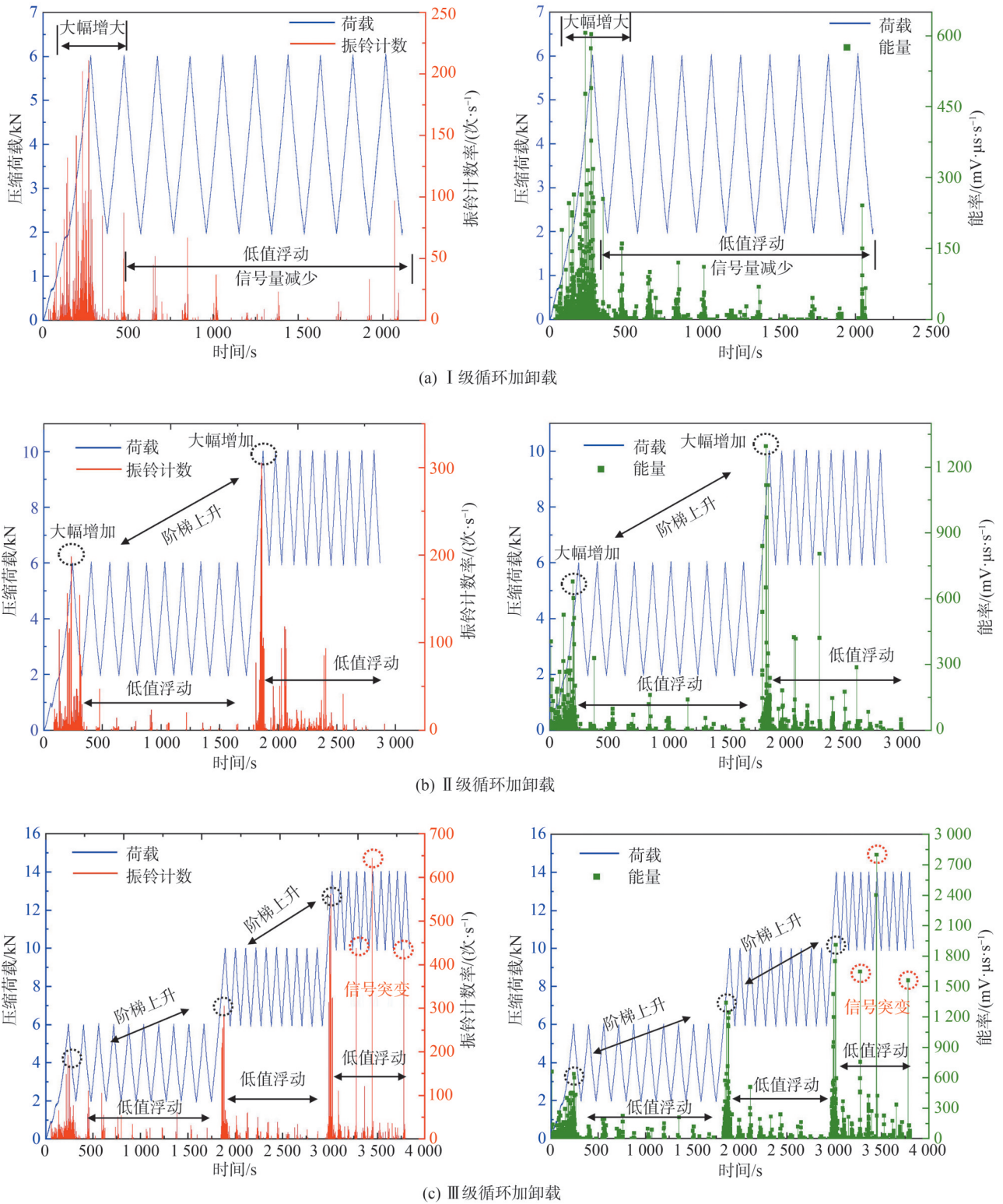


图 8 饱和含水煤样循环加卸载声发射特征

Fig. 8 AE characteristics of saturated water-containing coal samples under cyclic loading and unloading

2.2 不同含水煤样循环加卸载孔隙发育特征

由弛豫分析可知,核磁共振  $T_2$  曲线能较好地反映被测煤岩试件内部孔隙结构的特征。孔隙孔径的大小与横向弛豫时间  $T_2$  成正相关,较大的  $T_2$  值对应着较大的孔隙尺寸;相反,较小的  $T_2$  值对应着较小的孔隙尺

寸。 $T_2$  谱图振幅可反映出不同孔径孔隙所对应的孔隙数量。研究<sup>[30-32]</sup>发现,煤中孔裂隙按孔径大小分为微孔( $<0.1 \mu\text{m}$ )、中孔( $[0.1,100.0] \mu\text{m}$ )和大孔(或微裂隙, $>100.0 \mu\text{m}$ )。在  $T_2$  频谱中能识别出这3类孔裂隙,其中,微孔、中孔、大孔的  $T_2$  频谱主要分布在 $[0.1, 2.5) \text{ms}$ 、

[2.5, 100.0] ms、>100.0 ms。不同含水状态下 3 级循环加卸载试件的  $T_2$  曲线如图 9 所示。图 9 中, XH-0、XH-

I、XH-II、XH-III 分别表示未循环、I 级循环、II 级循环、III 级循环加卸载。

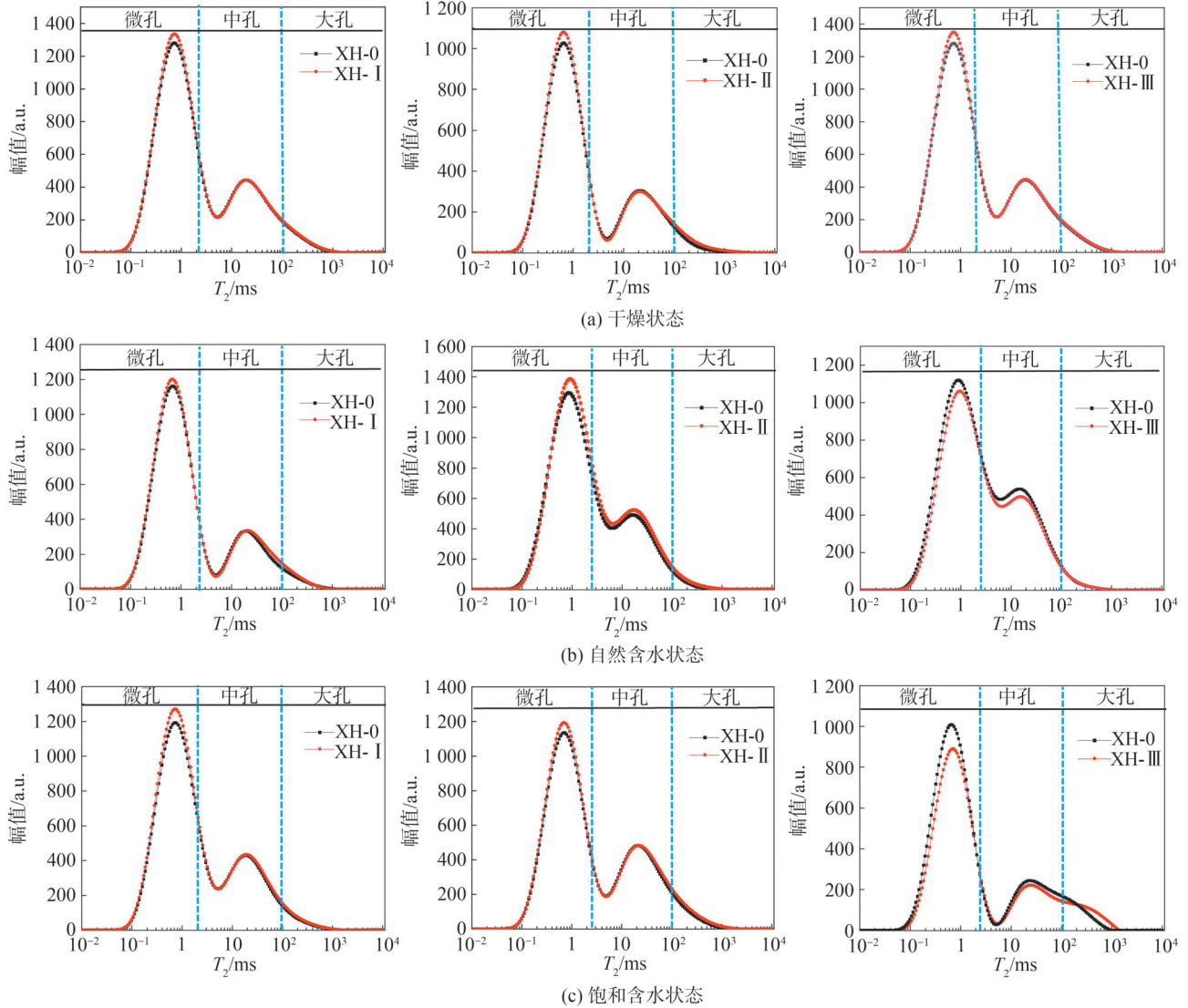


图 9 不同含水状态下 3 级循环加卸载后煤样  $T_2$  曲线

Fig. 9  $T_2$  curves of coal samples after unloading in three cycles with different water contents

从图 9 中可知, 3 级循环加卸载后各级干燥煤样的  $T_2$  曲线幅值相较于未循环加卸载煤样均增大, 干燥煤样的孔隙数量随循环级数的增加而增多。自然和饱和煤样在前两级循环加卸载后产生了具有更小或更大孔径的孔隙,  $T_2$  曲线幅值增加, 同时曲线范围变宽并向右半部分偏移, 煤样内部的孔隙数量有所增加; 在 3 级循环加卸载后, 中微孔数量降低幅度较大, 大孔数量均有小幅增长, 煤样内部总体孔隙数量降低。

由图 9 计算出煤样的不同孔隙区间的面积及占比, 采用峰面积增长率分析煤样在循环加卸载后不同孔径孔隙的变化规律。煤样微孔的弛豫时间主要分布在  $T_2$  曲线的第 1 峰 ( $P_1$ ) 区间内, 中孔及大孔的弛豫时间主要分布于第 2 峰 ( $P_2$ ) 区间内, 用  $P_1$  峰面积增长率表示微孔的数量增长速度, 用  $P_2$  峰面积增长率表示中

大孔的数量增长速度, 峰面积增长率计算如式 (2) 所示。

$$\xi_s = \frac{S_i - S_0}{S_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $\xi_s$  为峰面积增长率,  $S_i$  为第  $i$  级循环加卸载后煤样  $T_2$  峰面积 ( $i$  为 I、II、III),  $S_0$  为未进行循环加卸载时煤样  $T_2$  峰面积。

不同含水状态下试件的核磁共振峰面积增长率如表 2 ( $\xi_{SP1}$  和  $\xi_{SP2}$  分别为  $P_1$ 、 $P_2$  峰面积增长率) 与图 10 所示。图 10 中的柱状图参考两列图例叠加。由图 10 可知: I 级循环加卸载后, 干燥煤样的大中孔增长幅度更大, 而自然和饱和煤样的微孔增长幅度更大, 但整体增幅普遍不高, 表明在 I 级循环加载期间干燥煤样以大中孔增长为主, 自然和饱和煤样以微孔增长为

主,但增长不明显。Ⅱ级循环加卸载后,自然与饱和煤样的两个峰面积均发生了大幅度的增长, $P_2$ 的增长幅度略高于 $P_1$ ,自然煤样的 $P_2$ 面积增长率为13.24%,饱和煤样的 $P_2$ 面积增长率为10.05%;干燥煤样的双峰面积增长较Ⅰ级循环略有增高,自然和饱和煤样中的微孔和中大孔数量大幅增加且中大孔数量增长略高于微孔,干燥煤样微孔数量增长明显且中大孔增长较低。Ⅲ级循环后,自然煤样的双峰面积均发生了下降, $P_1$ 下降幅度较大;饱和煤样 $P_1$ 面积大幅下降, $P_2$ 面积小幅提升;干燥煤样双峰面积仍有小幅提升。自然煤样微孔及中大孔孔隙数量均发生了降低;饱和煤样的内部微孔数量降低,中大孔数量小幅增长;干燥煤样的内部不同孔径孔隙进一步增多。

表2 不同含水状态试件峰面积增长率

Tab.2 Peak area growth rates of specimens in different water content states

含水状态	Ⅰ级循环		Ⅱ级循环		Ⅲ级循环	
	$\xi_{SP1}/\%$	$\xi_{SP2}/\%$	$\xi_{SP1}/\%$	$\xi_{SP2}/\%$	$\xi_{SP1}/\%$	$\xi_{SP2}/\%$
饱和	6.06	4.22	9.97	10.05	-7.23	2.38
自然	5.04	2.50	12.06	13.24	-7.36	-6.23
干燥	2.01	4.92	4.81	5.20	4.57	5.92

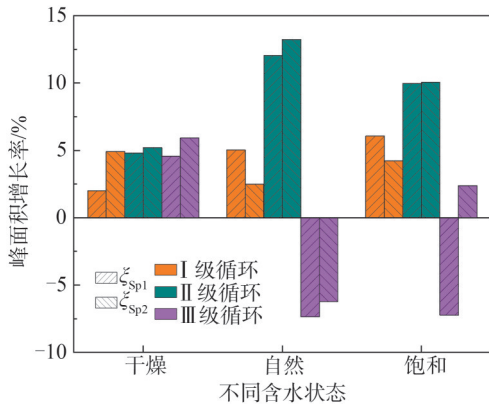


图10 不同含水状态试件峰面积增长率

Fig.10 Peak area growth rates of specimens in different water content states

这可能是由于干燥煤样的孔隙骨架结构未受水浸弱化作用,在3级循环加卸载后,其孔隙骨架虽有扩展但仍能保持完整性;而水浸弱化作用造成自然煤样孔隙骨架结构强度降低,在3级循环加卸载后,煤样孔隙骨架结构产生累积损伤使其孔洞坍塌,产生永久变形,卸载后孔隙未能恢复到原来的状态,使闭合的孔隙数量远大于新生孔隙的数量,造成了整体孔隙数量降低;饱和煤样的弱化作用更强,在3级循环加卸载后,大部分中微孔隙闭合,内部整体孔裂隙闭合数量大于新增孔隙数量,但小部分中微孔隙破裂贯通产生了更大的孔裂隙结构,使中大孔数量超过了闭合的

数量,造成微孔数量降低、中大孔隙数量增长的现象。

由此推测,含水煤体随着循环应力的增大,孔隙变化呈现低幅增大—降低—增大的趋势。

孔隙度反映了煤体内部微观结构情况。核磁共振技术(NMR)可探测煤样孔隙中水的分布及含量。当煤样处于饱和状态时,其内部水体积的大小可近似为其内部孔隙的体积,进而计算出孔隙度。因此核磁共振技术可用来测试煤样的孔隙度。利用NMR测煤样孔隙度的具体流程为:首先,利用已知孔隙度的专用标样测出相应的 $T_2$ 曲线单位体积信号幅度,并以此拟合出单位体积信号幅度与孔隙度之间的线性关系;然后,将测试出的煤样单位体积信号幅度代入拟合公式即可得到试样孔隙度。

煤样NMR孔隙度试验采用核磁共振配套的孔隙度分别为6%、15%、25%、30%的专用标样进行定标。NMR定标曲线如图11所示。

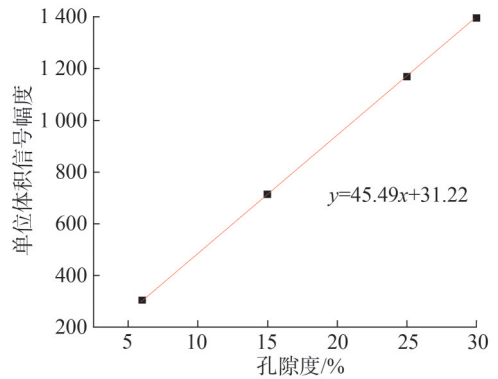


图11 NMR定标曲线

Fig.11 NMR calibration curve

定标拟合公式见式(3):

$$y = 45.49x + 31.22 \tag{3}$$

式中, $y$ 为煤样的单位信号幅度, $x$ 为孔隙度。

将测得的煤样单位信号幅度代入式(3),即可计算出不同含水煤样3级循环加卸载孔隙度变化,如表3和图12所示。结合表3和图12可知,不同含水状态煤样的孔隙度变化随循环加卸载级数的增加具有差异性。Ⅰ级循环加卸载后,各含水状态的煤样孔隙度增长不明显,且随含水程度的增加呈现递增趋势,增长

表3 不同含水煤样3级循环加卸载孔隙度变化

Tab.3 Porosity variation of three-stage cyclic unloading of coal samples with different water contents

含水状态	Ⅰ级循环/%			Ⅱ级循环/%			Ⅲ级循环/%		
	XH-0	XH-I	差值	XH-0	XH-II	差值	XH-0	XH-III	差值
干燥	4.37	4.56	0.19	5.21	5.50	0.29	6.04	6.37	0.33
自然	5.62	5.89	0.27	4.99	5.70	0.71	5.74	5.29	-0.45
饱和	5.20	5.52	0.32	3.85	4.07	0.22	3.74	3.53	-0.21

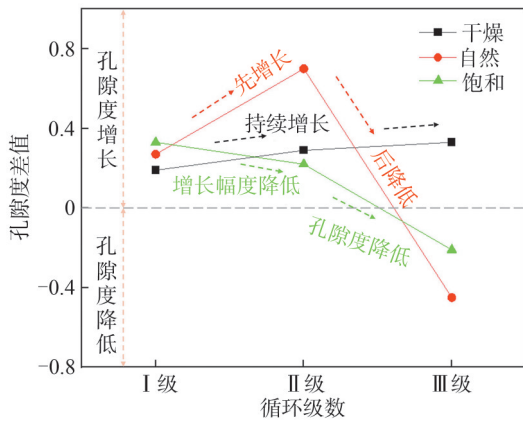


图 12 不同含水状态 3 级循环加卸载孔隙度变化

Fig. 12 Variation of porosity of three-stage cycle with unloading in different water content states

最大的为饱和含水煤样,增幅为 0.32%。Ⅱ级循环加卸载后,相较于Ⅰ级循环加卸载,干燥煤样的孔隙度有小幅提升;自然含水煤样的孔隙度增幅最大,增长了 0.71%;饱和煤样的孔隙度增幅有所降低,由 0.32%

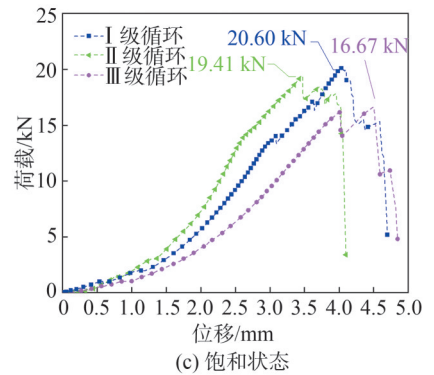
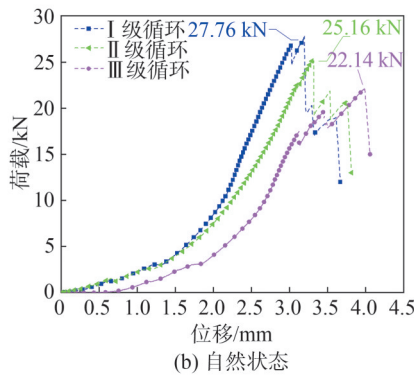
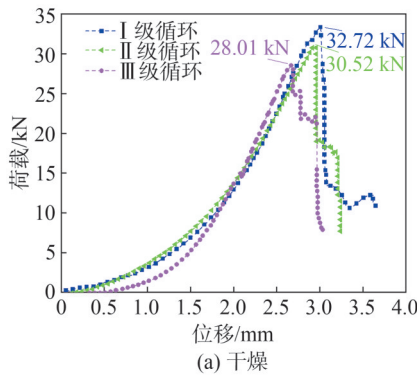


图 13 不同含水状态损伤煤样荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of damaged coal samples under different moisture content states

由图 13 可知,煤样在循环加卸载后残余变形均出现了不同程度的增加。可以看出:循环加卸载对煤样的内部结构和物理性质产生弱化,从而导致残余变形增加;同时,残余变形量随含水量的增大而增大,表明水加剧了循环加卸载对煤样的弱化作用。为进一步分析含水状态及循环加卸载对煤样的弱化效应,计算煤样的力学参数,即煤样强度,见表 4。

表 4 循环加卸载后煤样强度

Tab. 4 Coal samples strength after cyclic loading and unloading

含水状态	最大荷载/kN			抗压强度/MPa		
	I 级	II 级	III 级	I 级	II 级	III 级
干燥	32.72	30.52	28.01	16.67	15.55	14.27
自然	27.76	25.16	22.14	14.15	12.82	11.28
饱和	20.60	19.41	16.67	10.50	9.89	8.49

降至 0.22%。Ⅲ级循环加卸载后,干燥煤样的孔隙度持续增长,自然和饱和煤样的孔隙度降低且自然含水状态下煤样孔隙度的降低幅度更大,降低了 0.45%;饱和煤样的降幅低于自然煤样,结合  $T_2$  谱图可知,饱和煤样大孔隙数量增幅更大,使得煤样的孔隙度降幅减小。

综上所述:煤样在循环加卸载过程中伴随着孔隙的闭合与开裂,在循环加卸载后,煤样内部的孔隙度变化同内部孔隙闭合与开裂的数量占比有关,当煤样内部孔隙闭合的数量小于孔隙开裂的数量时,可造成孔隙度增长。

### 2.3 不同含水状态煤样循环加卸载力学损伤机理

3 级循环加卸载后,对煤样进行核磁共振扫描获取其孔隙发育情况;随后,将煤样恢复至之前的含水状态进行单轴压缩至破裂,并对不同含水煤样循环加卸载后的强度弱化情况进行分析,获得煤样荷载-位移曲线,如图 13 所示。

由表 4 可知,总体上,在 3 级循环加卸载后,煤样强度表现的趋势具有一致性,即随着含水状态的增加,试件的抗压强度下降。因此,对Ⅲ级循环加卸载下不同含水程度煤样的抗压强度进行对比分析可知:Ⅲ级循环加卸载下干燥煤样的抗压强度为 14.27 MPa,较未进行循环加卸载时平均值降低了 9.85%;饱和煤样的抗压强度为 8.49 MPa,较未进行循环加卸载时平均值降低了 24.87%;在自然状态下,煤样的抗压强度低于干燥煤样,高于饱和煤样;相较于自然及饱和状态煤样,干燥煤样由于仅受循环加卸载作用而未受到水浸弱化作用影响,其抗压强度更高。

煤样的强度随着循环次数和含水量的增加逐渐降低。水对煤岩的损伤机理可以分为 3 个部分,即:孔隙水压力的影响、物理化学的影响、液桥力的作用。其中:孔隙水压力主要通过降低煤岩的有效应力及抗剪强度来减弱煤体的整体强度;水与煤岩的物理化学作

用主要通过降低内摩擦角和内聚力来劣化其整体强度;液桥力是内聚力的一部分,当煤体处于高含水状态时,液桥力随含水率的增高而降低,从而造成煤岩强度降低。因此,水的存在对煤样的循环加卸载损伤具有加剧作用。

### 3 结 论

1) 试验监测表明,自然、饱和煤样的振铃计数和能量与干燥煤样相比有所降低,水岩作用对声发射具有弱化效应。循环应力作用下,煤体的损伤破坏主要发生在首次达到每级峰值荷载时,随后仅发生小幅度损伤。含水煤样在累积应力作用下易发生应力突变,造成煤体瞬时损伤破坏,且突变次数随含水程度同步增加。

2) 干燥煤样的孔隙数量随循环加载级数的增加而增多。自然、饱和煤样在前两级循环加卸载后孔隙数量增加,3级循环加卸载后总体孔隙数量降低。应力较低时,煤样孔隙数量增多且以中小孔发育为主,随着循环应力增大,含水煤体孔隙变化呈现“增大—降低—增大”特征。应力作用下水浸煤体孔隙变化剧烈,易产生大孔隙,造成煤体损伤。

3) 煤样在循环加卸载后残余变形增加,循环加卸载对煤样的内部结构和物理性质产生弱化。水浸作用对煤体循环加卸载损伤具有加剧效应。

#### 参考文献:

[1] Gu Dazhao, Li Jingfeng, Cao Zhiguo, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079–3089. [顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079–3089.]

[2] Peng Suping, Bi Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River Basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211–1221. [彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211–1221.]

[3] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[4] Xie Heping, Xu Weilin, Liu Chao, et al. The subversive idea and key technical prospects on underground hydraulic engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 781–791. [谢和平, 许唯临, 刘超, 等. 地下水利工程战略构想及关键技术展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 781–791.]

[5] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期

(2030、2050)发展战略研究——综合卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[6] Gu Dazhao, Li Ting, Li Jingfeng, et al. Current status and prospects of coal mine water treatment technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 11–18. [顾大钊, 李庭, 李井峰, 等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 11–18.]

[7] Gu Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239–246. [顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239–246.]

[8] Gu Dazhao. Modern mining of water resources and surface ecological protection technology for coal in the energy “Golden Triangle”[J]. Chinese Engineering Science, 2013, 15(4): 102–107. [顾大钊. 能源“金三角”煤炭现代开采水资源及地表生态保护技术[J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 102–107.]

[9] Gu Dazhao, Zhang Yong, Cao Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 1–7. [顾大钊, 张勇, 曹志国. 我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 1–7.]

[10] Zhang Cun, Wang Fangtian, Bai Qingsheng. Underground space utilization of coalmines in China: A review of underground water reservoir construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103657.

[11] Gu Dazhao, Yan Yongguo, Zhang Yong, et al. Experimental study and numerical simulation for dynamic response of coal pillars in coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1589–1597. [顾大钊, 颜永国, 张勇, 等. 煤矿地下水库煤柱动力响应与稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1589–1597.]

[12] Wang Fangtian, Liang Ningning, Li Gang, et al. Failure evolution mechanism of coal pillar dams in complex stress environment[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1145–1152. [王方田, 梁宁宁, 李岗, 等. 复杂应力环境煤柱坝体损伤破坏规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1145–1152.]

[13] Lai Xingping, Zhang Shuai, Dai Jingjing, et al. Multi-scale damage evolution characteristics of coal and rock under hydraulic coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Supp2): 3217–3228. [来兴平, 张帅, 代晶晶, 等. 水力耦合作用下煤岩多尺度损伤演化特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊2): 3217–3228.]

[14] Wang Yungang, Li Mangui, Chen Bingbing, et al. Experimental study on ultrasonic wave characteristics of coal samples under dry and water saturated conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2445–2450. [王云

- 刚,李满贵,陈兵兵,等.干燥及饱和含水煤样超声波特征  
的实验研究[J].煤炭学报,2015,40(10):2445–2450.]
- [15] Ai Ting, Wu Shiyong, Zhang Ru, et al. Changes in the structure and mechanical properties of a typical coal induced by water immersion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104597.
- [16] Zhang Cun, Ma Jianqi, Lan Shiyong, et al. Strength weakening characteristics and microscopic mechanism of coal samples with different water contents based on penetration strength[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51 (Supp1): 40–49. [张村, 马建起, 兰世勇, 等. 基于针入强度的不同含水率煤样强度弱化特征与微观机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(增刊1): 40–49.]
- [17] Wang Kai, Jiang Yifeng, Xu Chao. Mechanical properties and statistical damage model of coal with different moisture contents under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1070–1079. [王凯, 蒋一峰, 徐超. 不同含水率煤体单轴压缩力学特性及损伤统计模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1070–1079.]
- [18] Wang Fangtian, Wei Xueqian, Shao Dongliang, et al. The progressive failure mechanism for coal pillars under the coupling of mining stress and water immersion in underground reservoirs[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(4): 103.
- [19] Li Bobo, Wang Zhonghui, Ren Chonghong, et al. Mechanical properties and damage constitutive model of coal under the coupled hydro-mechanical effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 315–323. [李波波, 王忠晖, 任崇鸿, 等. 水–力耦合下煤岩力学特性及损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 315–323.]
- [20] Li Bobo, Li Jianhua, Yang Kang, et al. Coal permeability model and evolution law considering water influence[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3396–3403. [李波波, 李建华, 杨康, 等. 考虑水分影响的煤岩渗透率模型及演化规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3396–3403.]
- [21] Hu Guozhong, Yang Nan, Zhu Jian, et al. Experimental study on porosity and permeability characteristics and surface crack evolution characteristics of water-bearing coal under microwave radiation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Supp2): 813–822. [胡国忠, 杨南, 朱健, 等. 微波辐射下含水分煤体孔渗特性及表面裂隙演化特征实验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊2): 813–822.]
- [22] Royer–Carfagni G, Salvatore W. The characterization of marble by cyclic compression loading: Experimental results [J]. Mechanics of Cohesive–Frictional Materials, 2000, 5(7): 535–563.
- [23] Wu Baoyang, Wang Weinan, Guo Dongming. Strength damage and AE characteristics of fractured sandstone under the influence of water intrusion times[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(5): 1054–1060. [吴宝杨, 王伟男, 郭东明. 浸水次数影响下裂隙砂岩强度损伤及声发射特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 1054–1060.]
- [24] Wang Fangtian, Shao Dongliang, Niu Tengchong, et al. Progressive loading characteristics and accumulated damage mechanisms of shallow-buried coal pillars in withdrawal roadways with high-strength mining effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1148–1159. [王方田, 邵栋梁, 牛腾冲, 等. 浅埋高强度开采回撤巷道煤柱卸载特征及累积损伤机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1148–1159.]
- [25] Cerfontaine B, Collin F. Cyclic and fatigue behaviour of rock materials: Review, interpretation and research perspectives[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(2): 391–414.
- [26] Yang Yongjie, Xing Luyi, Duan Huiqiang, et al. Fatigue damage evolution of coal under cyclic loading[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(18): 560.
- [27] Lv Jiakun, Yang Yongjie, Ning Shan, et al. The fatigue strength and failure mode of coal sample subjected to cyclic loading[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(3): 2255–2266.
- [28] Ye Pingping, Li Bobo, Wu Xuehai, et al. Study on coal seepage evolution mechanism under cyclic loading and unloading of pore pressure[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(4): 739–749. [叶平平, 李波波, 吴学海, 等. 孔隙压力循环加卸载下煤岩渗流演化机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(4): 739–749.]
- [29] Liu Yongqian. Experimental analysis of coal permeability evolution under cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2579–2588. [刘永茜. 循环载荷作用下煤体渗透率演化的实验分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2579–2588.]
- [30] Qin Lei. Pore evolution after fracturing with cyclic liquid nitrogen and the mechanism of permeability enhancing [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018. [秦雷. 液氮循环致裂煤体孔隙结构演化特征及增透机制研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.]
- [31] Li Jielin, Zhou Keping, Zhang Yamin, et al. Experimental study of rock porous structure damage characteristics under condition of freezing–thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1208–1214. [李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6):

1208–1214.]  
 [32] Liu Yanfei, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Characteristics of the stress deformation of pore-fracture in coal based on nuclear magnetic resonance[J]. Journal of China Coal Soci-

ety, 2015, 40(6): 1415–1421. [刘彦飞, 汤达祯, 许浩, 等. 基于核磁共振的煤岩孔裂隙应力变形特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1415–1421.]

## Experimental Research on Progressive Damage Mechanism for Water Immersed Coal Under Cyclic Loading and Unloading

WANG Fangtian<sup>1,2</sup>, TANG Tiankuo<sup>1</sup>, ZHANG Cun<sup>3\*</sup>, DOU Fengjin<sup>4</sup>, WEI Xueqian<sup>1</sup>, SUN Nuan<sup>1</sup>, CHENG Jiazhang<sup>1</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

4. Jinjie Coal Mine, Shandong Coal Group Corporation, Yulin 719319, China)

### Abstract:

**Objective** The technology of underground coal mine reservoirs has become an effective method for protecting and utilizing mine water resources. Among these, the stability of the coal pillar is critical to the safe operation of underground coal mine reservoirs. The coal pillar is subjected to the long-term and repeated action of various mining stresses. The water-bearing state of the coal pillar varies significantly at different periods of water storage in coal mine underground reservoirs, and the influence of the long-term and repeated mining stresses also differs accordingly. Therefore, studying the deformation and mechanical characteristics of coal samples under different water content conditions and subjected to cyclic loading and unloading contributes to a better understanding of the coal pillar failure mechanism.

**Methods** Cylindrical standard specimens in three water-containing states, dry, natural, and saturated, were fabricated, respectively. First, the appropriate cyclic load was selected for the cyclic loading and unloading test through a preloading test. Then, the uniaxial graded cyclic loading and unloading test was conducted, and the number of cycles at each load level was increased to analyze the complete process of fatigue damage in coal and rock under multiple cyclic loads. The damage characteristics of coal samples were monitored using acoustic emission (AE) equipment, and the pore development of the coal samples was detected using nuclear magnetic resonance (NMR) equipment

**Results and Discussions** The average maximum loads of the dried, natural, and saturated coal samples, measured through the preloading experiment, were 32.77, 27.69, and 22.45 kN, respectively. Compared to the dried coal samples, the average maximum load of the saturated coal samples decreased by 31.49%, indicating that water deteriorated the strength parameters of the coal samples. The acoustic emission signals of coal samples with varying water content states increased gradually with the number of circulation stages, and the degree of fracture development also increased accordingly. Under the action of cyclic stress, the damage and failure of coal mainly occur when the peak load of each level is reached for the first time. The water-rock interaction exhibited a weakening effect on acoustic emission. Under cyclic stress, water-containing coal samples were prone to stress-induced mutations, resulting in instantaneous damage and destruction to the coal body. In addition, with the increase of water content, the number of stress mutations also increased. Under the same load, the damage degree of saturated coal samples was higher, resulting in the further development of internal microfissures and the generation of more acoustic emission signals, which partially counteracted the weakening effect of water on the acoustic emission signals. Both natural and saturated coal samples experienced further damage and destruction during the loading and unloading of the third-level cycle, with the saturated coal samples exhibiting a higher degree of damage. After cyclic loading and unloading, the pore number of the dried coal samples increased with the number of cycle stages. After the first two stages of cyclic loading and unloading, the natural and saturated coal samples developed pores with varying diameters, and the number of internal pores increased. However, after the third stage of cyclic loading and unloading, the number of medium and micropores significantly decreased. The number of large pores has increased slightly, resulting in an overall decrease in the number of internal pores. During the first-stage cyclic loading period, dried coal samples primarily showed growth in macropores, while natural and saturated coal samples primarily exhibited growth in micropores, though the growth was not substantial. After the loading and unloading of the second-level cycle, the bimodal growth area of the dried coal samples was slightly larger than that observed in the first-level cycle. The number of small and medium pores in the natural and saturated coal samples increased significantly, with the growth in medium pores being slightly higher than that of micropores. The number of micropores in the dried coal samples increased significantly, while the growth in medium pores remained relatively low. After the third-level cycle, the number of micropores and medium-large pores in natural coal samples decreased. In saturated coal samples, the total number of internal pores decreased, whereas the number of medium and large pores increased slightly. In dried coal samples, the number of pores with different diameters continued to increase. Pore changes in water-bearing coal bodies exhibited a low-range trend of “increase—decrease—increase” with increasing cyclic stress. After the loading and unloading of stage I and stage II cycles, the porosity of each coal sample increased. After stage III cycles, the po-

porosity of the dried coal sample continued to increase, while that of the natural and saturated coal samples decreased. In addition, the reduction in porosity of the coal sample in its natural water-containing state was greater, by 0.45%. The decrease in the porosity of the saturated coal sample was smaller than that of the natural coal sample. Combined with the  $T_2$  spectrum, The number increase of macropores in saturated coal samples is greater, which reduces the porosity decrease. The compressive strength of the dried coal sample after grade III cyclic loading and unloading was 14.27 MPa, which was 9.85% lower than the average value before cyclic loading and unloading. The compressive strength of the saturated coal sample was 8.49 MPa, which was 24.87% lower than the average value under initial conditions without cyclic loading and unloading. The strength of the coal samples decreased with the increase in water content and the number of cycles.

**Conclusions** This study reveals the damage and failure mechanisms of coal subjected to hierarchical cyclic loading conditions by analyzing the acoustic emission characteristics and pore evolution patterns of coal samples with different water contents under cyclic loading

**Key words:** coal pillar; water immersed coal body; cyclic loading and unloading; pore change; damage evolution

(编辑 李轶楠)

引用格式: Wang Fangtian, Tang Tiankuo, Zhang Cun, et al. Experimental research on progressive damage mechanism for water immersed coal under cyclic loading and unloading[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(4): 89–102. [王方田, 汤天阔, 张村, 等. 循环加卸载作用下水浸煤体渐进损伤机理试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(4): 89–102.]