

震动载荷多次作用下烟煤孔裂隙结构演化特征试验研究

马衍坤^{1,2}, 黄勤豪^{1,2}, 孔祥国³, 冯俊军⁴, 殷志强^{1,2}, 王超^{1,2}

(1. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽淮南 232001;2. 安徽理工大学 煤矿深井开采灾害防治技术科技研发平台,安徽淮南 232001;3. 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西西安 710054;4. 安徽工业大学 建筑工程学院,安徽马鞍山 243032)

摘要:煤层开采过程中频繁采掘扰动或远场顶板周期性破断会产生多次的震动载荷,震动载荷对于煤样微观孔裂隙结构和宏观力学行为具有重要影响。为探索震动载荷下煤样孔裂隙结构演化特征,选取烟煤煤样,利用霍普金森压杆(SHPB)试验系统开展了多次震动载荷冲击煤样试验,借助低场核磁共振分析仪测试了每次冲击后煤样 T_2 谱,并通过核磁共振成像(MRI)分析了煤样孔裂隙分布及其损伤演化特征。结果表明,随着震动载荷作用次数增加,煤样峰值应力与动态弹性模量均呈现线性下降趋势,震动载荷冲击效应使得煤样承载和抵抗变形能力显著弱化,因此有必要对煤样孔裂隙演化特征展开深入分析。从 T_2 谱和MRI信息得出,震动载荷初次作用下煤样总体孔隙体积大幅增加,其中吸附孔体积增高达5.0倍,随着震动载荷持续作用,煤样微裂隙开始连通汇聚形成宏观裂纹,使得渗流孔之间连通性大幅提高,煤样总体孔隙率达到峰值,较煤样原始孔隙率提高约6倍。在煤样受震动载荷损伤、破坏的整个过程中,渗流孔的连通性逐渐提高与改善,其分形维数呈线性下降趋势。通过核磁共振成像揭示了震动载荷对煤样孔裂隙作用机制,结果表明煤样中部区域孔隙最先发育并逐步形成微裂隙,在后续震动波反射、拉伸作用下,损伤破坏区域向两侧逐渐演变直至贯通试样。

关键词:震动载荷;核磁共振(NMR);能量耗散;孔裂隙演化;损伤演化机制

中图分类号:TD324 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2024)04-1882-12

Experimental study on the evolution characteristics of bituminous coal pore-fissure structure under multiple vibration loads

MA Yankun^{1,2}, HUANG Qinhao^{1,2}, KONG Xiangguo³, FENG Junjun⁴, YIN Zhiqiang^{1,2}, WANG Chao^{1,2}

(1. Provincial and Ministry Co-sponsored Coal Mine Safe and High-efficient Mining MOE Key Laboratory, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Scientific Research and Development Platform of Disaster Prevention Technology in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: Frequent mining disturbance or periodic rupture of far-field roof in coal seam mining will produce multiple vibration loads, which have an important influence on the micro pore-fissure structure and macro mechanical behavior of coal. In order to explore the evolution characteristics of pore-fissure structure of coal under vibration load, the SHPB test system was used to carry out a multiple vibration load impact test on bituminous coal. With the help of low-field nuclear magnetic resonance analyzer, the T_2 spectrum of coal after each impact was tested, and MRI was performed to analyze the law of pore distribution and evolution, and the damage evolution characteristics of coal pore-fissure structure were studied.

收稿日期:2023-11-14 修回日期:2024-02-07 责任编辑:王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.XR23.1505

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174161, 52227901);国家重点研发计划资助项目(2022YFC3004603)

作者简介:马衍坤(1985—),男,山东肥城人,教授,博士生导师。E-mail: mykunbest@126.com

引用格式:马衍坤,黄勤豪,孔祥国,等.震动载荷多次作用下烟煤孔裂隙结构演化特征试验研究[J].煤炭学报,2024,

49(4): 1882-1893.

MA Yankun, HUANG Qinhao, KONG Xiangguo, et al. Experimental study on the evolution characteristics of bituminous coal pore-fissure structure under multiple vibration loads[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1882-1893.



移动阅读

The results demonstrate that the peak stress and dynamic elastic modulus of coal show a linear decline trend with the increase of vibration load, and the impact effect of vibration load significantly weakens the bearing capacity and deformation resistance of coal, so it is necessary to conduct in-depth analysis on the evolution characteristics of coal pore cracks. According to the T_2 spectrum and MRI information, the total pore volume of coal increases greatly under the first action of vibration load, in which the adsorption pores volume increases by 5.0 times. With the increase of the number of vibration loads, the volume of seepage pores begins to increase significantly, while the volume of adsorption pores remains basically unchanged until the sample is completely destroyed. During the multiple action of the vibration load, the internal damage of the coal body gradually accumulates from the initial point distribution to strip distribution until micro-cracks are formed. With the multiple action of the vibration load, the microcracks of the coal sample begin to connect and converge to form macrocracks, which greatly improves the connectivity between the seepage pores, and the overall porosity of the coal sample reaches a peak value, about 6 times higher than the original porosity. During the whole process of coal body being damaged and destroyed by vibration load, the connectivity of seepage pores is gradually increased and improved, and its fractal dimension shows a linear decline trend. The MRI reveals the mechanism of vibration load on coal pore-fissure, and the results show that the central region of the coal first develops and gradually forms microcracks. Under the action of reflection and stretching of subsequent vibration waves, the damaged areas gradually extend to both sides until penetrating the sample.

Key words: vibration load; nuclear magnetic resonance technology(NMR); energy dissipation; pore-fissure evolution; damage evolution mechanism

我国化石能源赋存具有“富煤、贫油、少气”的基本特点,这导致在未来较长一段时间内,煤炭仍是我国能源的主体。随着煤矿开采深度逐渐增加,采场结构越发复杂,煤层开采过程中常伴随矿震、爆破及采掘活动等扰动因素,频繁对煤体施加震动载荷,持续破坏煤体的孔裂隙结构,形成累积损伤效应甚至造成大规模动力破坏,导致煤岩动力灾害的发生,严重威胁煤矿安全生产^[1-3]。

根据动载作用后煤岩体的最终形态,将动载荷区分为单次扰动未引起煤体宏观破裂的震动载荷和导致煤体宏观破坏的冲击载荷^[4]。

国内外学者采用实验室试验手段,对冲击载荷下煤体损伤、破坏规律进行大量研究,尤其是 SHPB 试验系统在煤体动力学试验研究中已被广泛运用,并借助高速摄影仪对煤体的动态破坏过程进行分析。张军胜等^[5]利用贫瘦煤开展了动态冲击试验,建立了煤的塑性硬化—软化过程动态损伤本构模型。AI 等^[6]基于二维图像分析了分形维数变化,研究发现了冲击载荷作用下煤体裂纹扩展的演化规律。LI 等^[7]将高速摄像和数字图像相关(DIC)技术与声发射监测(AE)同步,得到了烟煤裂纹演化规律。郑钰等^[8]利用无烟煤开展冲击试验,利用高速相机记录煤体动态破坏过程信息,并利用分形维数衡量不同冲击载荷下煤体的破碎特征。沈荣喜等^[9]借助真三轴霍普金森压杆系统结合高速摄影,得出了单轴和真三轴应力状态下煤体冲击破坏特征的区别。相关研究主要聚焦于煤体冲击载荷下的宏观破坏,尤其是表面破坏形态,未

涉及煤体孔裂隙结构损伤、破坏特征。

部分学者引入 3D 轮廓扫描、扫描电镜(SEM)、CT 断层扫描等分析技术,研究冲击载荷作用下煤体微观结构损伤特征。罗宁等^[10]利用 3D 轮廓扫描仪量化断裂面的粗糙度,分析循环冲击下破碎煤体的断裂面特征。陈彦龙等^[11]结合扫描电镜测试了冲击破坏后煤体断面特征,分析煤体的细观断裂机理。王登科等^[12]利用 CT 扫描系统对一次冲击致裂的砂岩试样进行三维裂隙重构,通过裂隙分布情况来表征砂岩的损伤。LI 等^[13]对双向静载和冲击动载耦合条件下的煤体进行 CT 扫描 3D 裂纹重建,得出了动静耦合作用下煤体内部结构的损伤规律。CT 断层扫描 2D 切片三维重构技术是一种可提供三维微观裂纹信息的无损观测方法,已在煤岩微观损伤研究领域进行广泛运用^[14]。纳米 CT 虽然精度较高,但其观测范围有限,对于非均质性较强的煤岩,观测结果的代表性不强。

核磁共振(NMR)是一种精度高(可检测最小孔径达 0.1 nm)、无损的孔隙结构测试技术^[15],可用于分析煤岩体孔裂隙结构的演化特征。赵洪宝等^[16]对煤体进行落锤试验,借助核磁共振分析仪获得了冲击前后煤体的 T_2 谱分布,利用孔隙数量和孔径的变化分析了煤体的微观损伤特征。LUO 等^[17]对完成多次循环冲击后的煤体进行核磁共振分析,研究冲击载荷对煤层压裂效果的影响。

综上所述,实验室试验普遍采用冲击载荷,借助 3D 轮廓扫描、电镜扫描和 CT 断层扫描、核磁共振等监测手段来分析煤岩体的破坏特征。在矿井开采过

程中,多次的震动载荷冲击作用会持续改变煤体物理结构与力学特性,进而对煤岩动力灾害的发生产生重要影响^[18]。

笔者针对震动载荷多次冲击作用下煤体孔隙结构的演化特征,利用霍普金森(SHPB)试验系统开展了震动载荷冲击煤体试验,借助低场核磁共振分析仪,测试了每次冲击后煤体的 T_2 谱、孔隙率,并进行了 MRI 成像,分析了煤体孔隙分布及 MRI 成像中的信号演化规律,得到了煤体孔裂隙结构演化特征和损伤演化机制。研究揭示了震动载荷频繁冲击作用下煤岩体破坏机理,研究成果有助于进一步认识采场动载诱发煤岩复合动力灾害机理,为深部复合动力灾害防控提供科学理论支撑。

1 煤样制备与试验方案

1.1 煤样制备

对试验选取的烟煤煤样进行工业分析测试,其结果见表 1。此外,通过 X 射线衍射分析测试得出煤样内的矿物成分主要含有方解石,如图 1 所示。

表 1 煤样的工业分析结果

Table 1 Proximate analysis results of coal sample

水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%
0.90	18.75	17.96	62.40

根据国际岩石力学与岩石工程学会 (ISRM) 推荐标准,将煤样进行了切割、取心和打磨,得到了 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的标准煤样,煤样的端面不平行度小于 0.02 mm ,最大偏差度不超过 0.25° ,两端面垂直煤样轴线,如图 2 所示。

50 mm 的标准煤样,煤样的端面不平行度小于 0.02 mm ,最大偏差度不超过 0.25° ,两端面垂直煤样轴线,如图 2 所示。

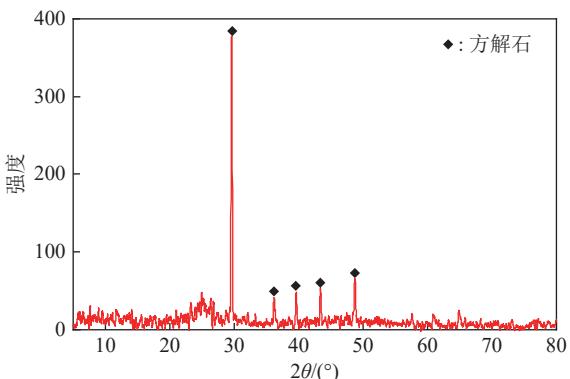


图 1 煤样的 XRD 图谱

Fig.1 XRD pattern of the coal sample



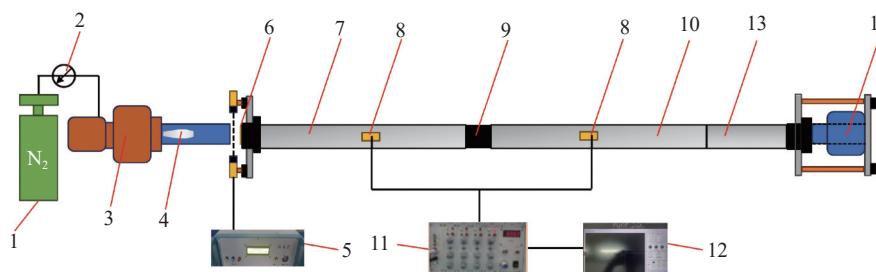
图 2 试验使用的煤样

Fig.2 Coal samples used in the test

1.2 试验方案

1.2.1 震动载荷冲击试验

震动载荷冲击试验采用 SHPB 试验系统,该系统主要包括:轴向加载装置、压杆装置、冲击子弹驱动装置、动态应变仪和激光测速仪,如图 3 所示。



1—氮气储气罐; 2—控压阀门; 3—发射腔与储气室; 4—纺锥型冲击子弹; 5—激光测速仪传感器及控制器; 6—整形片; 7—入射杆; 8—应变片; 9—煤样; 10—透射杆; 11—动态应变仪; 12—移动端信号采集和处理系统; 13—吸收杆; 14—轴压加载装置

图 3 SHPB 压杆试验系统结构示意

Fig.3 Structural diagram of SHPB testing system

试验开始前,对煤样进行试冲测试,确定冲击气压为 0.30 MPa,将应变片粘贴在入射杆和透射杆中端获取震动冲击产生的脉冲信号,利用动态应变仪采集记录该信号,用于检测试验系统的性能。

在煤体受到震动载荷冲击后,入射波应力和反射波应力之和与透射波应力近似相等,能够较好地满足应力平衡条件,证实了煤样在震动载荷作用过程中符合应力均匀性的假设,如图 4 所示。

当外部输入的累积能量超过煤样自身的临界破坏值时,煤样出现宏观裂纹,导致煤样逐步破坏、失效。笔者聚焦煤体孔裂隙结构逐步损伤、破坏的过程,因此在煤样表面出现宏观裂纹时即停止试验。

1.2.2 核磁信号测试

将震动载荷作用后饱水处理的煤样,进行核磁信号测试,获取煤样的 T_2 谱,并进行 MRI 成像。试验采用中尺寸核磁共振岩心分析系统 (MecroMR12-150H-

VTHP) 进行核磁信号测试, 如图 5 所示。试验采用 CPMG(Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 序列, 相关核磁参数设置如下: 回波时间 0.2 ms, 回波数量 12 000 个, 等待时间 3 000 ms, 累加采样次数 32 次。

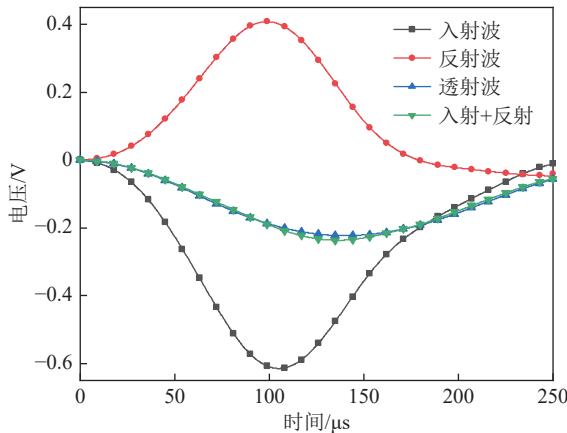


图 4 煤样动态应力平衡曲线

Fig.4 Dynamic stress balance curves of coal sample



图 5 核磁共振分析仪

Fig.5 NMR analyzer

2 试验结果与分析

2.1 媒体宏观劣化损伤规律

在震动载荷的多次冲击作用下, 煤样孔隙结构损伤程度不断发生改变直至煤样最终破坏, 该特征首先反映在煤样宏观动力学应力应变关系。通过震动载荷冲击试验, 得到了每次震动载荷作用后煤样的应力应变曲线, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 震动载荷冲击作用下, 煤样的动态应力应变曲线呈现 3 个阶段: 第 1 阶段为线弹性阶段, 应力呈现线性增长趋势; 第 2 阶段为塑性阶段, 应力增长趋势变缓, 煤样发生塑性变形, 内部萌生大量新的孔隙但未彻底失效破坏, 直至入射波应力达到峰值。第 3 阶段为卸荷阶段, 此时入射波应力开始下降, 煤样卸荷释放累积弹性能, 使得应力应变曲线出现不同程度应变回弹现象^[19], 煤样仍具有一定承载能力。随着冲击次数增加, 应变回弹趋势和幅度均明显减弱, 煤样承载力达到极限。

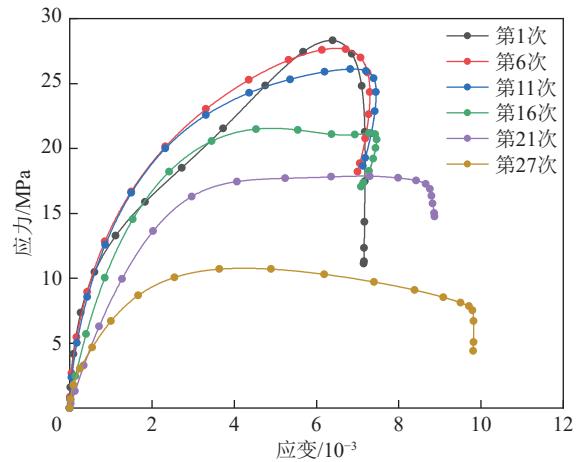
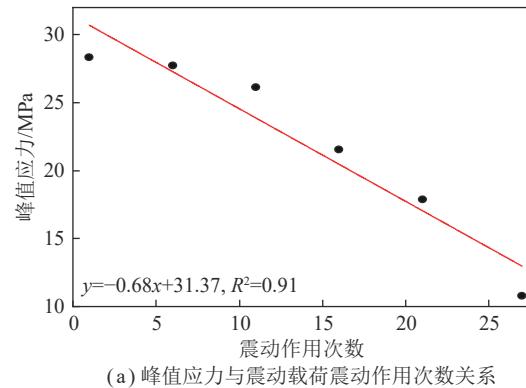


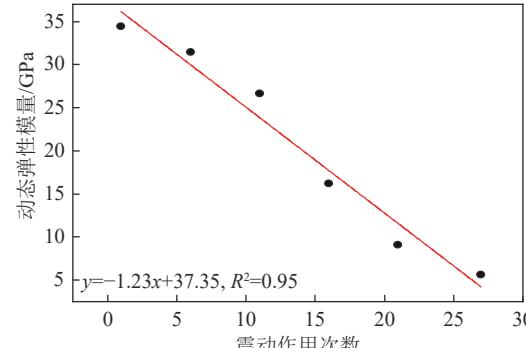
图 6 震动载荷冲击作用下煤样动态应力应变曲线

Fig.6 Equivalent stress-strain curves of coal sample under vibration load

为探明震动载荷对煤样动力学劣化规律, 进一步分析了煤样峰值应力和动态弹性模量随震动载荷作用次数的关系, 结果如图 7 所示。其中, 动态弹性模量是指动态应力-应变曲线弹性段的斜率, 用于表征震动载荷作用下煤样的抵抗变形能力, 也可从宏观层面反映煤样损伤程度。从图 7 可以看出, 相同的震动载荷作用下, 随着作用次数的增加, 煤样的峰值应力与动态弹性模量均呈现线性下降趋势。由于震动载荷冲



(a) 峰值应力与震动载荷震动作用次数关系



(b) 动态弹性模量与震动载荷震动作用次数关系

图 7 峰值应力和动态弹性模量变化示意
Fig.7 Change of peak stress and dynamic elastic modulus is indicated

击效应使得致密煤样内部不断萌生新的孔隙，煤样承载和抵抗变形能力严重弱化。因此，有必要对孔隙演化特征展开深入分析。

2.2 煤体孔隙结构演化特征

2.2.1 震动载荷作用下 T_2 谱变化规律

通过对震动载荷作用后煤样开展核磁共振测试，分析其孔隙演化特征，对弛豫时间选取对数坐标，得到煤样震动载荷冲击后横向弛豫时间 T_2 谱分布曲线，核磁共振 T_2 谱的幅值是一个无量纲值^[20]， T_2 谱的形态变化可反映煤样孔隙分布的变化， T_2 谱的弛豫时间变化可用于分析煤样孔径的改变， T_2 谱面积可用于分析煤样各类孔隙的体积^[21]。因此，利用震动载荷冲击前后煤样的 T_2 谱可分析煤样孔隙结构的演化特征规律。

根据 T_2 谱孔隙分类方法，煤样孔隙可分为微小孔 ($T_2 < 3.33$ ms)、中孔 (3.33 ms $\leq T_2 < 344$ ms) 和大孔 ($T_2 \geq 344$ ms)，微小孔也可称为吸附孔，中大孔可统称为渗流孔^[22]。震动载荷冲击前，煤样的初始孔隙率仅为 3.3%， T_2 谱表现出单峰形态，煤样整体相对致密，连通性不佳。根据 T_2 谱中各谱峰对应的位置关系，震动载荷多次冲击作用后煤样孔隙结构演化过程可划分为 4 个阶段。

(1) 吸附孔激增阶段， T_2 谱呈现明显的双峰形态，煤样内部连通性不佳，各谱峰相互独立，吸附孔的谱面积增幅明显。初次震动载荷冲击后吸附孔谱面积相对初始状态增幅约 5.0 倍，煤样主要表现出煤基质的损伤，形成了大量新的吸附孔。相较于初次震动，第 2 次震动载荷冲击作用下煤样局部基质在膨胀损伤、破坏过程中压缩到了初次震动形成的孔隙通道，使得渗流孔体积减少，渗流孔谱面积出现减小趋势(图 8)。

(2) 孔隙稳定增长阶段，该阶段 T_2 谱表现三峰分

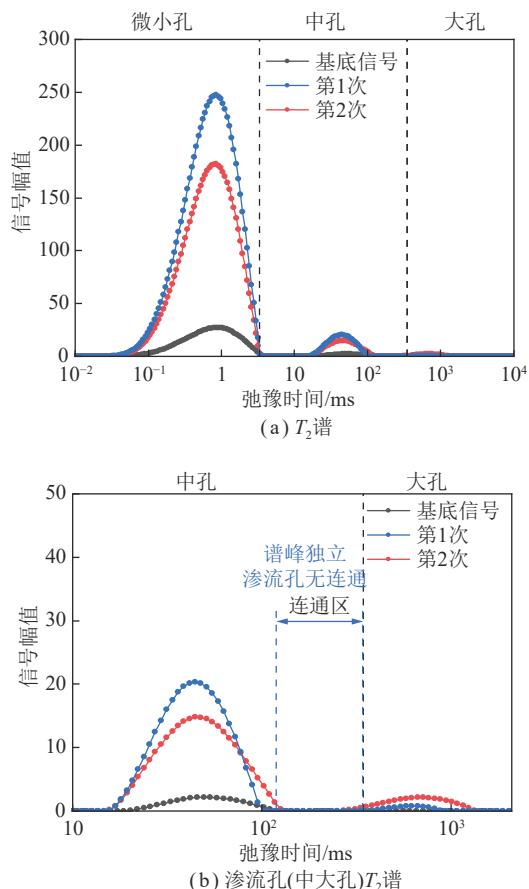


图 8 吸附孔激增阶段煤样 T_2 谱演化曲线

Fig.8 T_2 spectrum evolution of coal sample during the surge stage of adsorption pores

布形态，各谱峰仍相对独立，起初煤样内部连通性仍然较差，微裂隙尚未出现，在震动载荷多次冲击作用下，渗流孔发育，谱峰出现右移，弛豫时间增加^[23]，中孔与大孔间谱峰出现“靠拢”趋势，渗流孔连通趋势开始显现，如图 9 所示。

(3) 微裂隙形成阶段，该阶段中孔向大孔、微裂隙

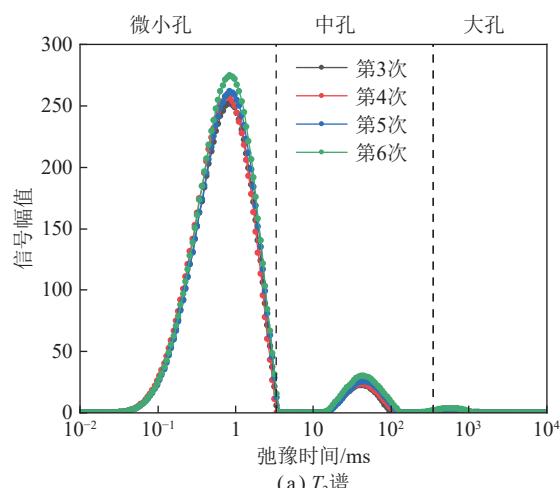
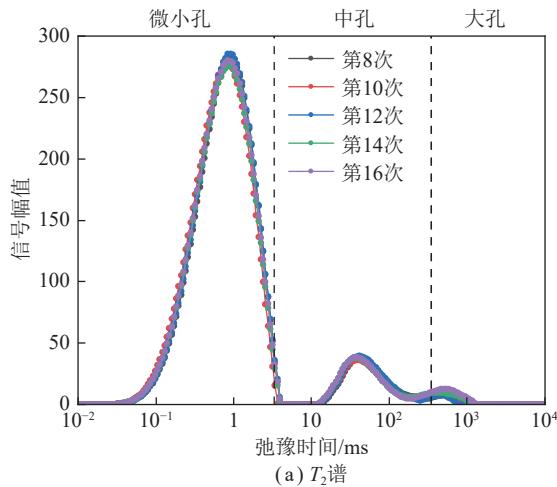


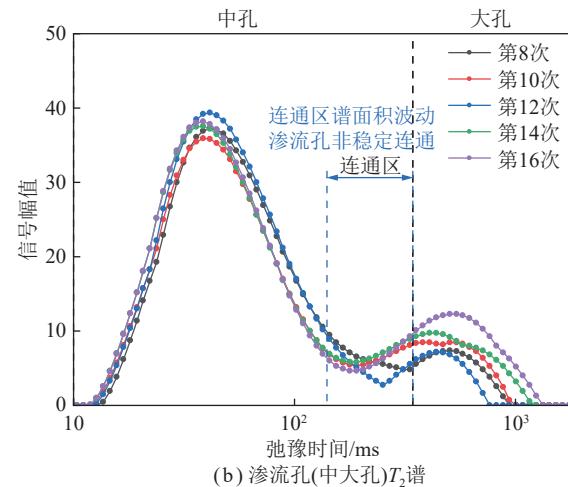
图 9 孔隙稳定增长阶段煤样 T_2 谱演化曲线

Fig.9 T_2 spectrum evolution of coal sample during the stable growth stage of pores

发育,使得138~344 ms内各孔径孔隙均有分布,煤样连通性得到一定的改善,中大孔谱峰出现“合并”现象,

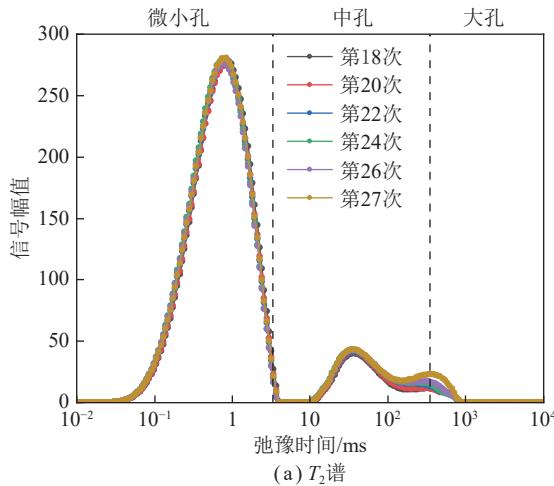
(a) T_2 谱

微裂隙初步成形但受震动波扰动影响较大,上述区间 T_2 谱曲线出现波动变化,如图10所示。

图10 裂隙形成阶段煤样 T_2 谱演化曲线Fig.10 T_2 spectrum evolution of coal sample during microcrack formation

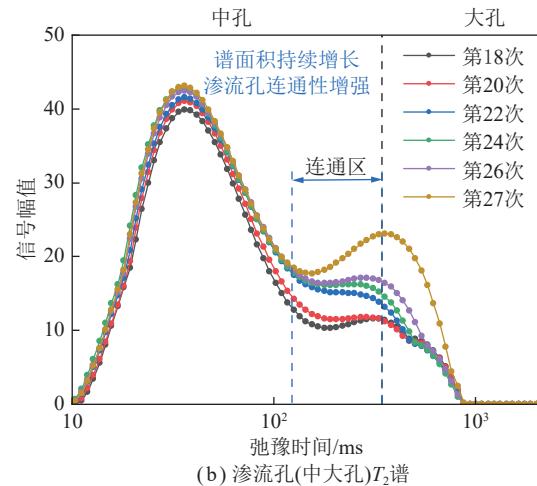
(4) 裂隙连通阶段,一方面渗流孔中的中孔继续向大孔演化并逐步形成新的裂隙,另一方面煤样内在前期震动载荷作用下形成的各类孔隙结构持续发

育、连通,渗流孔体积快速增大,渗流孔连通性显著增强,直至煤样表面出现宏观裂纹,使得峰值应力跌落(图11)。

图11 裂隙连通阶段煤样 T_2 谱演化曲线Fig.11 T_2 spectrum evolution of coal sample during the connected of microcrack

2.2.2 孔隙连通性变化规律

震动载荷多次作用下煤样的孔隙结构变化较为明显,促进渗流孔连通性的改善,使煤结构更加连贯。在这一过程中煤样 T_2 谱演化曲线最显著的变化是渗流孔(中孔和大孔)谱峰间138~344 ms内的连通性逐渐增强。根据煤样孔隙分布情况,利用 T_2 谱中弛豫时间为138~344 ms区域(连通区)的孔隙谱面积评估渗流孔连通性的改善程度,并以该部分孔隙谱面积占渗流孔总谱面积的比值来分析渗流孔连通性的变化规律。阶段I、II,煤样各类孔隙分布相对独立,连通性较差;阶段III,渗流孔连通性逐步增强,微裂隙的



出现更加促进了渗流孔连通性的提高;阶段IV,微裂隙持续发育,裂隙间相互连通、交织,渗流孔连通性显著增强,如图12所示。

2.3 煤样微观损伤演化的MRI表征

利用核磁共振仪测试分析整个煤样内部的空间水分分布信息,并将其进行二维投影,反演得到煤样的MRI图像。由于渗流孔积聚了更多的水分,因而MRI图像中信号显著增强的区域,对应着渗流孔体积大幅增长的区域。渗流孔体积的增长,可一定程度反映出煤样的损伤变化。因此,可以利用MRI图像对煤样内的损伤区域进行分析。

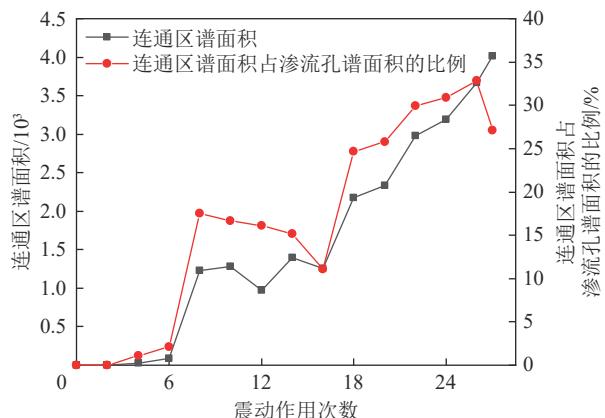


图 12 连通区谱面积及其占渗流孔谱面积的比例变化

Fig.12 Variation diagram of pore area in the connected region and its proportion to the spectral area of seepage pore

对比分析多次震动载荷冲击后煤样内 MRI 二维图像的变化, 可直观得到煤样损伤的区域分布与发展特征^[24], 如图 13 所示, 其中 X 方向为震动载荷冲击方向。图 13 中, 蓝色区域表示信号微弱区域, 绿色、黄色区域代表信号较强区域、红色区域代表信号强烈区域, 像素点颜色越深, 孔隙、裂隙发育程度愈好, 反之孔隙、裂隙发育程度愈差^[25]。

根据 MRI 图像, 煤样孔隙结构损伤区域整体呈现由点状分散分布形态向复杂条状交织分布形态转变。

阶段 I, 由于煤样较为致密, 孔隙率较低, 初始阶段煤样内部各区域信号响应非常微弱, 如图 13(a)~(c) 所示。震动载荷冲击产生的震动波从高波阻抗的杆件传入低波阻抗的煤样, 波形发生多次偏转, 在此过程中煤基质产生破坏形成新的吸附孔, 煤样内形成少量损伤区域, 呈现点状分散分布。

阶段 II, 随着震动载荷冲击次数的增加, 渗流孔开始逐步增多, 损伤区域信号响应增强, 并出现由点状分散分布向条状集中分布的趋势, 如图 13(d)~(g) 所示。

阶段 III, 各损伤区域内响应信号开始由点状分散分布向条状集中分布转变, 如图 13(h)~(l) 所示。一方面震动波所携带的能量用于使得中孔扩展, 部分中孔在扩展过程中沟通其他孔隙结构形成裂隙, 另一方面应力波传播过程中的反射、拉伸使得大孔、裂隙破裂, 能量不能完全用于发育已经形成的裂隙, 煤样内部裂隙连通性非稳定上升, 直至第 18 次震动载荷冲击后, 裂隙出现相互交织趋势, MRI 图像出现明显的条状损伤区域。

阶段 IV, 各条状损伤区出现复杂的条状形态, 如图 13(m)~(r) 所示。震动载荷冲击使得裂隙持续连通, 图中原有信号聚集区域颜色愈深, 范围愈广, 多次震动载荷冲击持续扩展并连通煤样内部各类孔隙和

裂隙, 最终煤样表面出现宏观裂纹。

3 讨 论

3.1 煤样损伤能量耗散规律

在震动载荷多次冲击作用下, 煤样孔隙结构不断损伤、破坏, 直至煤样表面出现宏观裂纹。整个过程中, 震动波形不断发生变化, 能量的耗散规律也较为明显。因此, 有必要从能量机制方面对煤样损伤演化进行分析。

在 SHPB 试验中, 入射能主要转化为反射能、透射能和耗散能, 当煤样损伤程度越高, 则耗散能在入射能中的占比越高, 因此, 通过分析能量耗散规律可以从宏观角度探究煤样损伤演化特征^[26]。根据弹性波理论, 入射能 W_I 、反射能 W_R 及透射能 W_T 的计算方法为

$$W_i = A_s C_s E_s \int_0^t \varepsilon_i^2(t) dt \quad (i = I, R, T) \quad (1)$$

式中, A_s 为输入与输出杆的横截面积, m^2 ; C_s 为压杆中的应力波速度, 本装置为 4 967 m/s; E_s 为输入与输出杆材料的弹性模量, GPa; $\varepsilon(t)$ 为应力波对应的应变; t 为应力波脉冲持续时间。

忽略入射杆、透射杆与煤体界面的能量损失, 煤样冲击加载过程中, 其内部孔隙损伤萌生及演化过程均与耗散能有关, 其耗散能 W_D 计算公式为

$$W_D = W_I - W_R - W_T \quad (2)$$

由于入射速度近似相等, 入射能大小趋于一致, 故对于多次震动载荷冲击试验, 可计算每次震动载荷作用后煤样的反射能、耗散能和透射能在入射能中占比 η_R 、 η_T 以及 η_D , 从能量变化角度反映煤样整体损伤趋势, 计算公式为

$$\eta_i = \frac{W_i}{W_I} \times 100\% \quad (i = R, T, D) \quad (3)$$

在震动波作用下, 动能、声能和热能等耗散能忽略不计, 吸收能完全用于煤样的损伤^[27]。对于震动载荷冲击作用下的致密煤样, 反射能占入射能的比例为 34.28%~70.10%, 透射能占入射能的比例为 3.98%~20.06%, 耗散能比例为 25.92%~45.67%, 震动载荷冲击产生的能量在穿越煤体的过程中发生多次反射, 部分用于损伤煤样孔隙结构, 只有少部分能量传递到透射杆, 如图 14 所示。

结合 T_2 谱变化趋势, 第 I 阶段, 震动载荷的能量主要用于煤样基质的破坏, 导致大量吸附孔的形成, 此时煤体孔隙率仅从 3.3% 增至 3.5%, 煤样仍然相对

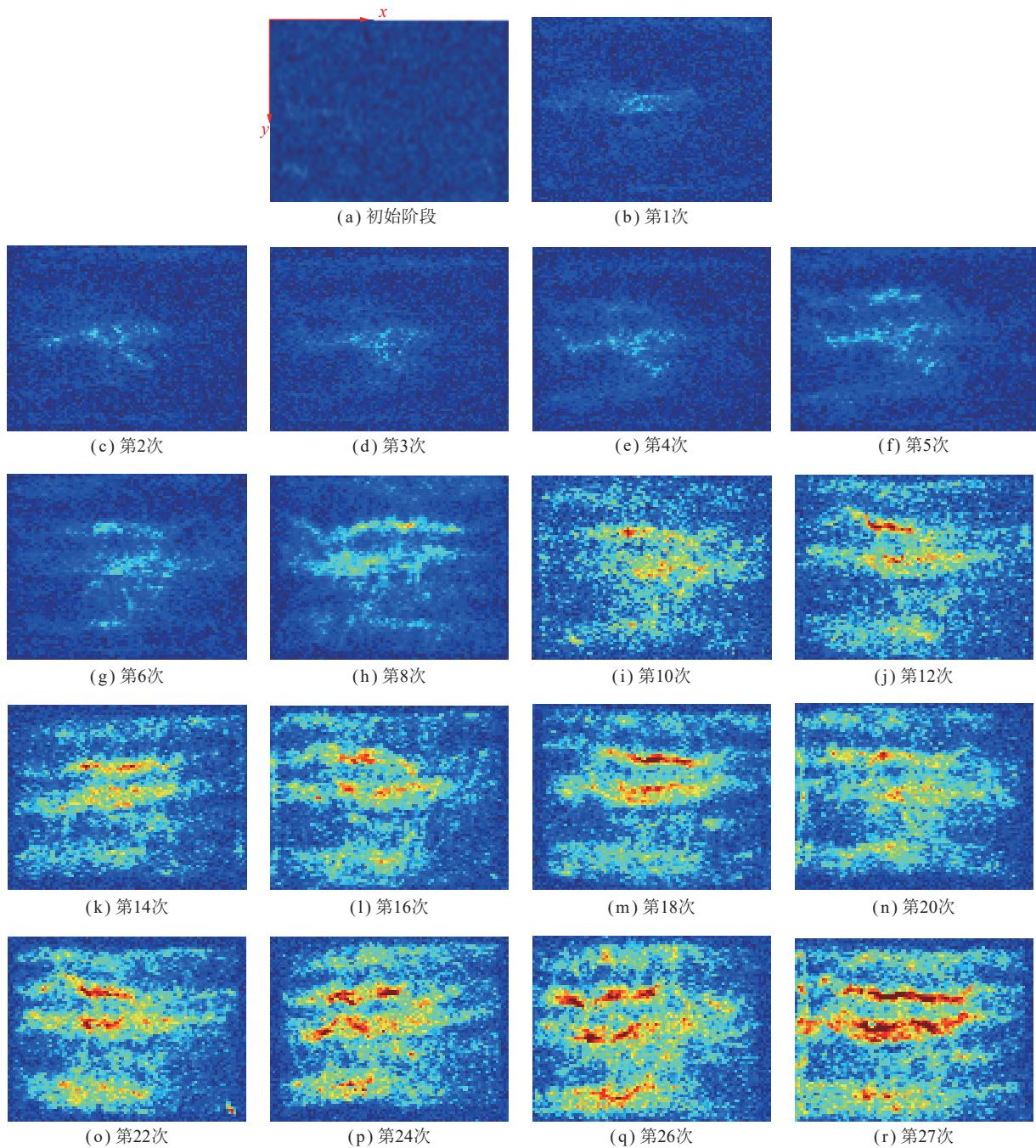


图 13 震动载荷冲击作用后煤样 MRI 图像

Fig.13 MRI of coal sample after vibration load

致密, 损伤较为微弱, 3 种能量的占比变化较小; 第Ⅱ阶段, 渗流孔体积出现增长, 使得煤样的孔隙结构发生改变, 孔隙率增至 5.4%, 反射能占比开始呈现增长趋势; 第Ⅲ阶段, 渗流孔之间连通性增强, 煤样内部出现微裂纹, 反射能占比增大了 19.65%, 该阶段的能量主要用于提高煤样渗流孔之间的连通性, 煤样损伤持续增大; 第Ⅳ阶段, 煤样渗流孔的连通性显著增强, 传递至煤样的入射能部分被煤样内部孔隙结构吸收, 使得煤样内孔隙持续损伤, 进一步使得反射能占比变大, 最终导致能完全穿透煤样传递到透射杆的

能量占比锐减 75.59%。此外, 煤样损伤区域开始出现明显复杂条状形态, 表明耗散能主要用于前期散布微裂隙汇聚、扩展、连通, 直至煤样表面显现宏观裂纹。

3.2 孔隙演化规律

煤作为一种具有分形特征的多孔介质, 由分形理论得到的分形维数是表征多孔介质孔隙结构非线性特征和复杂程度的重要参数之一, 基于 T_2 谱对煤样不同孔隙的分形维数进行计算, 可定量分析多次震动载荷对煤样孔隙结构的影响, 核磁共振孔隙分形维数^[28]计算为

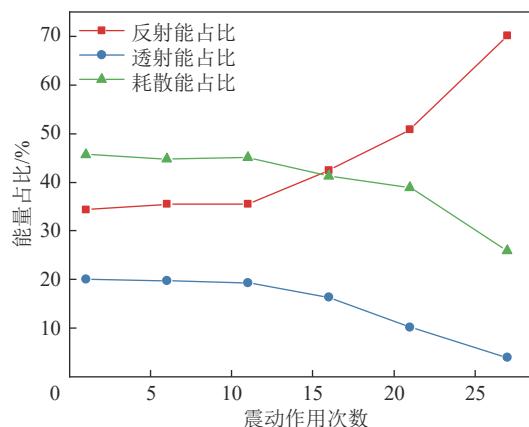


图 14 能量耗散与震动载荷冲击次数关系

Fig.14 Relationship between energy dissipation and number of vibration load

$$\lg S_V = (3 - D) \lg T_2 + (D - 3) \lg T_{2\max} \quad (4)$$

式中, S_V 为直径小于 r 的孔隙结构体积与总孔隙结构体积之比; D 为 NMR 分形维数; T_2 为横向弛豫时间, ms; $T_{2\max}$ 为最大横向弛豫时间, ms。

根据式(3)计算得出煤样吸附孔与渗流孔的分形维数, 现有研究表明, 有效分形维数为 2~3, 当孔隙结构分形维数越接近于 2 时, 煤样的孔隙结构越简单, 而当孔隙结构分形维数越接近于 3 时, 煤样孔隙结构越复杂。孔隙分形维数减小, 随机分布的细微孔洞损伤汇聚形成裂隙, 孔隙网络的连通性增强, 孔隙连通成缝的区域震动波发生更多次的反射、拉伸, 使得该区域进一步损伤, 煤样的破坏程度加剧。

煤样在多次的震动载荷冲击过程中吸附孔变化较小, 煤样孔隙结构演化以渗流孔占主导。因此重点对渗流孔的分形维数规律展开深入分析。渗流孔的分形维数 D_s 为 2.975~2.993, 渗流孔具有明显的分形特征, 且渗流孔的分形维数随震动作用次数增加呈现线性下降趋势, 如图 15 所示, 这是由于震动载荷多次

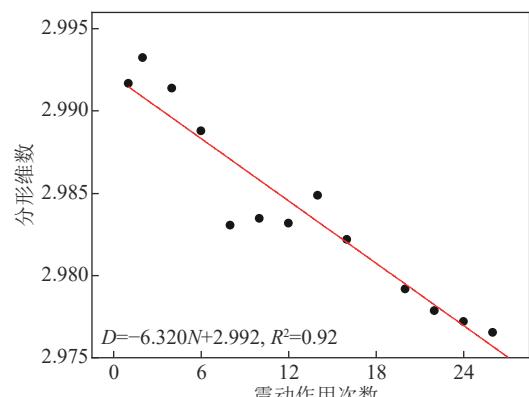


图 15 震动载荷冲击下渗流孔分形维数

Fig.15 Fractal dimension of seepage pores after vibration load

作用使得煤样内初始阶段随机散布的渗流孔逐渐连通、汇聚形成大裂隙, 整体孔隙网络的连通性增加所致。

结合 T_2 谱变化趋势, 第 I 阶段, 震动对煤基质造成破坏形成大量随机分布的吸附孔, 煤样内部孔隙网络的连通性减弱, 分形维数出现上升趋势。第 II 阶段, 煤样内出现孔隙连通趋势, 渗流孔的分形维数略微下降。第 III 阶段, 渗流孔非稳定连通形成裂隙, 分形维数在该阶段初期降低了 0.19%, 至该阶段结束其分形维数仅波动降低了 0.03%。第 IV 阶段, 原有裂隙的持续发育, 新的微裂隙不断出现, 裂隙间相互连通、交织, 使得煤样内孤立存在的渗流孔体积减少, 煤样内部孔隙网络连通性增强, 分形维数逐步降低, 直到煤样表面出现宏观裂纹, 此时只需较小的能量即可造成煤样的破坏。

3.3 煤样损伤演化机制

震动波反射、拉伸会对不同区域煤样孔隙结构造成损伤, 利用 Matlab 对 MRI 图像进行一维像素提取, 通过累积响应信号的变化趋势得出了煤样孔隙结构损伤区域演化特征, 揭示震动载荷对煤样孔裂隙作用机制。

震动载荷冲击方向为 X 轴, 与其垂直的方向为 Y 轴, 沿 X 方向(冲击方向)在 MRI 灰度图中按列提取 MRI 灰度图的累积灰度值, 共提取 90 次, 对应煤样长度 0.56 mm, 获得震动载荷冲击作用后 MRI 响应信号一维分布特征, 如图 16 所示。

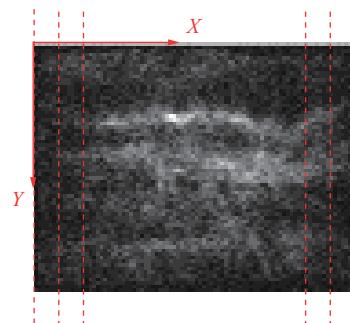


图 16 MRI 灰度图一维像素提取原理

Fig.16 Theory of one-dimensional pixel extraction in MRI gray image

为分析煤样损伤区域沿冲击方向的变化规律, 对 MRI 灰度图累积信号强度进行横向分析, 得出煤样内部孔隙结构损伤区域的偏移过程, 如图 17 所示。随着震动载荷冲击次数的增加, 煤样入射端损伤整体高于透射端。

第 I 阶段, 震动载荷冲击产生的震动波所携带的

能量大部分已被煤样入射端和中部区域吸收用于煤基质的破坏,促使大量吸附孔的出现,在震动波传递过程中能量不断衰减,使得煤样近入射端和中部区域的损伤略高于透射端,如图17(a)所示。

第Ⅱ阶段,在无侧限约束的震动载荷多次冲击过

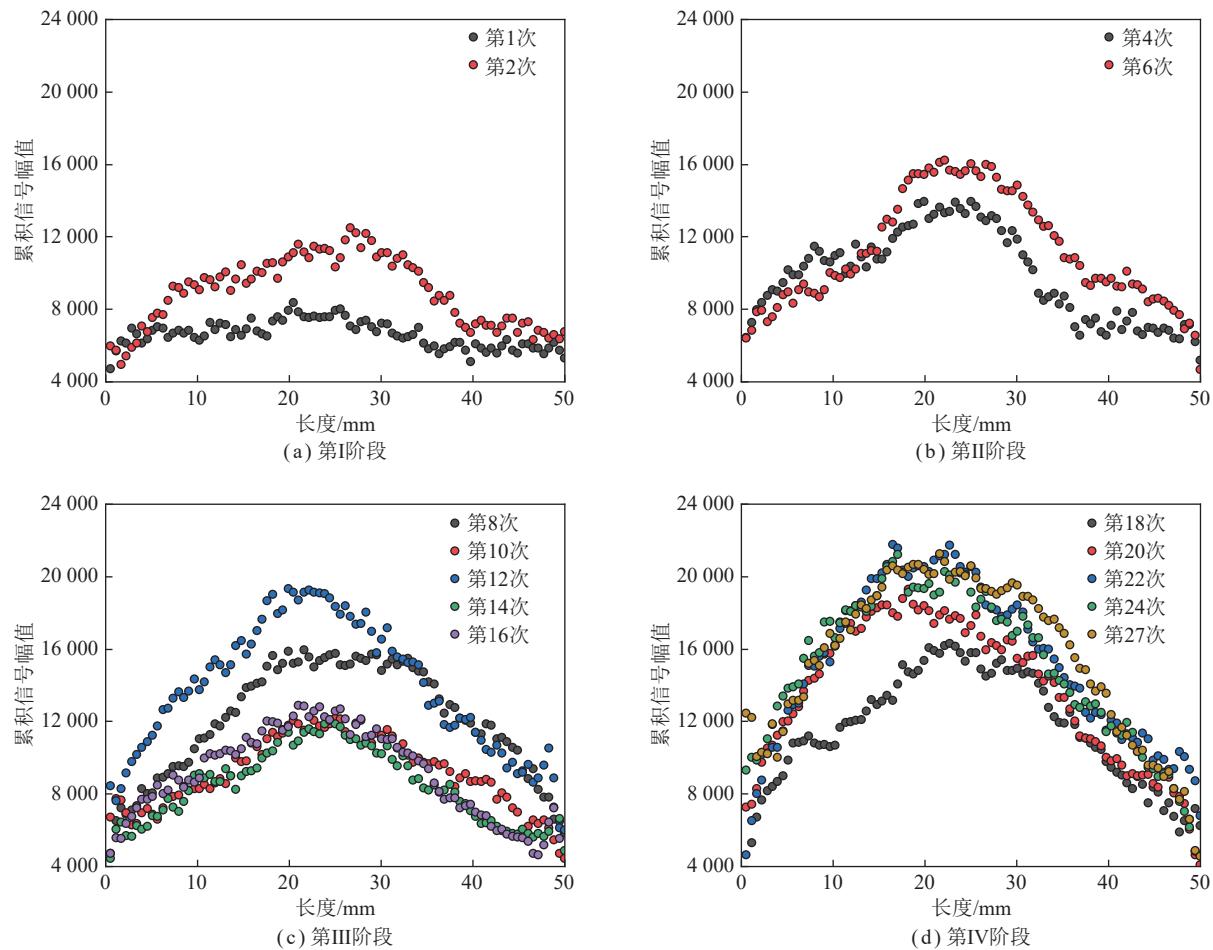


图17 一维条件下震动载荷冲击后煤样的MRI信号变化

Fig.17 MRI signal variation after vibration load under one-dimensional

第Ⅲ阶段,在冲击子弹撞击入射杆产生的震动波向前传递至煤样时,震动波所携带的能量一部分反射回入射杆,另一部分能量先用于煤样孔隙结构损伤、破坏后传播至透射杆,在震动波穿透煤样的过程中,煤样内部渗流孔连通形成微裂隙,并受泊松效应的影响产生侧向膨胀,微裂隙开始沿轴向扩展。同时,震动波在煤样内部传播过程中所携带的能量将先用于孔隙结构损伤较为严重的区域,促进该区域渗流孔连通形成新的微裂隙,使得该区域损伤程度强于其他区域。由于第Ⅱ阶段渗流孔损伤主要集中在中部区域,使得煤样中部区域累积信号强度强于两侧,如图17(c)所示,该阶段裂隙扩展处于非稳定阶段,各区域累积信号强度波动较大。

第Ⅳ阶段,结合透射能随震动载荷冲击次数的变

程中,煤样与弹性杆件接触的两端面产生端面效应,导致煤样变形不均匀,两端附近区域的横向变形被限制,中部区域在震动波作用下产生横向变形的能力略强于端面,煤样内靠近中部区域渗流孔最先发育,损伤较为严重,这与文献[29]结论一致,如图17(b)所示。

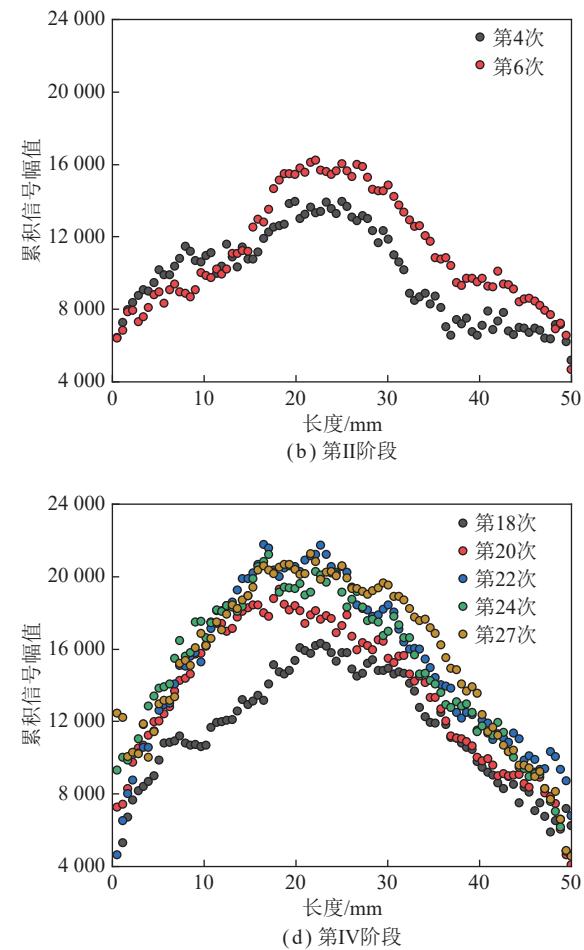


图17 一维条件下震动载荷冲击后煤样的MRI信号变化

Fig.17 MRI signal variation after vibration load under one-dimensional

化趋势,如图14所示,该阶段震动波传播过程中所携带的能量被临近入射端区域部分吸收促进微裂隙持续连通、扩展,煤样致密性减弱,反射能明显上升,能完全穿透煤样的透射波所携带的能量减弱,临近透射端区域损伤较弱,中部区域微裂隙在前期产生侧向膨胀,微裂隙间间隙增大,摩擦阻力减小,吸收较少的能量即可产生损伤,煤样孔隙损伤呈现中部强于两侧,入射端略强于透射端的趋势。在该阶段累积信号强度分布图中,出现信号凸起,表明该区域出现的微裂隙将各条状分布信号区域径向连通、交织,如图17(d)所示。

4 结 论

(1) 利用霍普金森压杆(SHPB)试验系统开展了

震动载荷多次冲击煤样试验,借助低场核磁共振系统测试分析了煤样孔隙分布及其变化规律,研究了震动载荷多次作用过程中煤样孔隙结构的损伤演化特征。

(2) 煤样在震动载荷多次作用下,随着震动载荷作用次数增加,煤样峰值应力与动态弹性模量均呈现线性下降趋势,表明震动载荷冲击效应使得煤样承载和抵抗变形能力显著弱化。

(3) 震动载荷多次冲击作用下,煤样从初次加载至最终出现宏观破裂,孔隙率相比原始煤样增长了6倍。在此过程中,煤样孔隙结构演化过程可分为4个阶段,分别为吸附孔激增阶段、孔隙稳定增长阶段、微裂隙形成阶段和裂隙连通阶段。

(4) 结合MRI成像和孔隙分形维数结果,震动载荷多次作用使得煤样损伤区域由点状散布形态向复杂条状交织形态转变,孔隙分形维数呈现下降趋势,煤样孔隙网络连通性提高,损伤程度加重。

(5) 煤样孔隙损伤呈现中部强于两侧,入射端略强于透射端的趋势,煤样偏中部区域孔隙最先发育并逐步形成微裂隙,在后续多次震动波的反射、拉伸作用下,损伤破坏区域向两侧逐渐延伸,直至煤样破坏。

参考文献(References):

- [1] 袁亮,王恩元,马衍坤,等.我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J].煤炭学报,2023,48(5):1825–1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825–1845.
- [2] 朱建波,马斌文,谢和平,等.煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱冲初探[J].煤炭学报,2022,47(9):3396–3409.
ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. Differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3396–3409.
- [3] KANG Hongpu, GAO Fuqiang, XU Gang, et al. Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines: A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 37–65.
- [4] 孔祥国,王恩元,李树刚,等.震动载荷下含瓦斯煤动力学特征[J].煤炭学报,2020,45(3):1099–1107.
KONG Xiangguo, WANG Enyuan, LI Shugang, et al. Dynamics characteristics of gas-bearing coal under shock load[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1099–1107.
- [5] 张军胜,郭帅房,张新生,等.冲击荷载下煤的塑性硬化-软化过程动态损伤本构模型[J].煤炭学报,2021,46(S2):759–769.
ZHANG Junsheng, GUO Shuaifang, ZHANG Xinsheng, et al. Dynamic damage constitutive model of plastic hardening softening process of coal under impacting load[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 759–769.
- [6] AI Dihao, ZHAO Yuechao, WANG Qifei, et al. Crack propagation and dynamic properties of coal under SHPB impact loading: Experimental investigation and numerical simulation[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, 105: 102393.
- [7] LI Jie, ZHAO Jie, WANG Haichang, et al. Fracturing behaviours and AE signatures of anisotropic coal in dynamic Brazilian tests[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 252(3): 107817.
- [8] 郑钰,施浩然,刘晓辉,等.不同应变率下煤岩破坏特征及其本构模型[J].爆炸与冲击,2021,41(5):45–57.
ZHENG Yu, SHI Haoran, LIU Xiaohui, et al. Failure characteristics and constitutive model of coal rock at different strain rates[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(5): 45–57.
- [9] 沈荣喜,顾周杰,王恩元,等.真三轴条件下煤样冲击动力学及破坏特征实验研究[J].煤炭学报,2023,48(5):2168–2178.
SHEN Rongxi, GU Zhoujie, WANG Enyuan, et al. Experimental study on impact dynamics and failure characteristics of coal specimen under true triaxial conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 2168–2178.
- [10] 罗宁,索云琛,张浩浩,等.循环冲击层理煤岩动力学行为及破坏规律研究[J].爆炸与冲击,2023,43(4):42–55.
LUO Ning, SUO Yunchen, ZHANG Haohao, et al. On dynamic behaviors and failure of bedding coal rock subjected to cyclic impact[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(4): 42–55.
- [11] 陈彦龙,李明,浦海,等.考虑循环载荷初始损伤效应的煤样动态力学特性试验研究[J].煤炭学报,2023,48(5):2123–2137.
CHEN Yanlong, LI Ming, PU Hai, et al. Experimental study on dynamic mechanical characteristics of coal specimens considering initial damage effect of cyclic loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 2123–2137.
- [12] 王登科,董博文,魏建平,等.不同冲击速度下含气砂岩损伤-渗流特性试验研究[J].煤炭学报,2023,48(5):2138–2152.
WANG Dengke, DONG Bowen, WEI Jianping, et al. Experimental study on damage and seepage features of gas bearing sandstone under different impact velocities loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 2138–2152.
- [13] LI Jie, ZHAO Jie, GONG Siyan, et al. Mechanical anisotropy of coal under coupled biaxial static and dynamic loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 143(3): 104807.
- [14] 张艳博,徐跃东,刘祥鑫,等.基于CT的岩石三维裂隙定量表征及扩展演化细观研究[J].岩土力学,2021,42(10):2659–2671.
ZHANG Yanbo, XU Yuedong, LIU Xiangxin, et al. Quantitative characterization and mesoscopic study of propagation and evolution of three-dimensional rock fractures based on CT[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2659–2671.
- [15] ZHAO Yu, WANG Chaolin, NING Lin, et al. Pore and fracture development in coal under stress conditions based on nuclear magnetic resonance and fractal theory[J]. *Fuel*, 2022, 309: 122112.
- [16] 赵洪宝,王中伟,胡桂林.动力冲击对煤岩内部微结构影响的NMR定量表征[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1569–1577.
ZHAO Hongbao, WANG Zhongwei, HU Guilin. Effects of dynamic loads on internal microstructure of coal by nuclear magnetic resonance(NMR)[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*

- eering, 2016, 35(8): 1569–1577.
- [17] LUO Ning, SUO Yunchen, FAN Xueru, et al. Research on confining pressure effect of porestructure of coal-rich in coalbed methane under cyclic impact[J]. Energy Reports, 2022(8): 7336–7348.
- [18] 曹安业, 窦林名, 白贤栖, 等. 我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1894–1918.
- CAO Anye, DOU Linming, BAI Xianxi, et al. State of the art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1894–1918.
- [19] LI Chengjie, XU Yin, CHEN Peiyuan, et al. Dynamic mechanical properties and fragment fractal characteristics of fractured coal–rock-like combined bodies in split Hopkinson pressure bar tests[J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29: 3179–3195.
- [20] 郭晨, 秦勇, 杨兆彪, 等. 黔西北德—三塘盆地煤储层 NMR T_2 谱及气水相渗特征与控制因素[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 841–852.
- GUO Chen, QIN Yong, YANG Zhaobiao, et al. Coal reservoirs NMR T_2 spectrum & gas-water relative permeability characteristics and their controlling factors in Bide-Santang basin, western Guizhou[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(5): 841–852.
- [21] LI Xiaoliang, LIU Zhengtang, FENG Xiaojun, et al. Effects of acid sulfate and chloride ion on the pore structure and mechanical properties of sandstone under dynamic loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(12): 6105–6121.
- [22] 翟成, 孙勇, 范宜仁, 等. 低场核磁共振技术在煤孔隙结构精准表征中的应用与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 828–848.
- ZHAI Cheng, SUN Yong, FAN Yiren, et al. Application and prospect of low-field nuclear magnetic resonance technology in accurate characterization of coal pore structure[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 828–848.
- [23] ZHANG Junjian, WEI Chongtao, JU Wei, et al. Stress sensitivity characterization and heterogeneous variation of the pore fracture system in middle-high rank coals reservoir based on NMR experiments[J]. *Fuel*, 2019, 238: 331–344.
- [24] WANG Gang, HAN Dongyang, QIN Xianjie, et al. A comprehensive method for studying pore structure and seepage characteristics of coal mass based on 3D CT reconstruction and NMR[J]. *Fuel*, 2020, 281(4): 118735.
- [25] 孙中光, 姜德义, 谢凯楠, 等. 基于低场磁共振的北山花岗岩热损伤研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1081–1088.
- SUN Zhongguang, JIANG Deyi, XIE Kainan, et al. Thermal damage study of Beishan granite based on low field magnetic resonance[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1081–1088.
- [26] FENG Junjun, WANG Enyuan, CHEN Xia, et al. Energy dissipation rate: An indicator of coal deformation and failure under static and dynamic compressive loads[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28(3): 397–406.
- [27] 张慧梅, 陈世官, 王磊, 等. 扰动冲击下弱胶结红砂岩的能量耗散与分形特征[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 622–631.
- ZHANG Huimei, CHEN Shiguan, WANG Lei, et al. Energy dissipation and fractal characteristics of weakly cemented red sandstone under disturbance impact[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 622–631.
- [28] 杨赫, 程卫民, 刘震, 等. 注水煤体有效渗流通道结构分形特征核磁共振试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1279–1286.
- YANG He, CHEN Weimin, LIU Zhen, et al. Fractal characteristics of effective seepage channel structure of water infusion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1279–1286.
- [29] 金解放, 李夕兵, 王观石, 等. 循环冲击载荷作用下砂岩破坏模式及其机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1453–1461.
- JIN Jiefang, LI Xibing, WANG Guanshi, et al. Failure modes and mechanisms of sandstone under cyclic impact loadings[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2012, 43(4): 1453–1461.