深井高应力浸水煤柱频繁冲击地压发生机理研究

张　翔[1],朱斯陶[1],王爱文[2],闫　才[1],代连朋[2],魏向志[3],张　明[4],王　博[5]
(1. 北京科技大学 资源与安全工程学院,北京　100083;2. 辽宁大学 灾害岩体力学研究所,辽宁 沈阳　110036;3. 河南大有能源股份有限公司 防治冲击地压部,河南 三门峡　472300;4. 安徽理工大学 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室,安徽 淮南　232001;5. 太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原　030024)

摘要:频繁扰动引发的高应力大巷浸水煤柱冲击地压机理研究较少,导致煤矿现场防治时缺乏足够理论依据.本文以山东省赵楼煤矿大巷水仓煤柱频繁冲击为工程背景,采用现场实测、室内试验等研究手段,研究了梯度含水饱和度的岩-煤-岩组合试样(RCRCS),在循环冲击模式下的力学响应及破坏特征,并探究了高静载-频扰动-恒浸水大巷煤柱频繁冲击的机理.结果表明:RCRCS煤层碎块分形维数与应变集中范围,随含水饱和度升高而持续增大,0%～33%区间增长最为显著.相较于循环强(2.8 m·s^{-1})、强弱组合(2.8/2.3 m·s^{-1})冲击,循环弱(2.3 m·s^{-1})冲击可缩小干燥与含水状态的强度差距.RCRCS局部应变程度随着循环强冲击次数增加整体快速均匀增长,循环弱冲击模式中前期损伤缓慢累积、后期宏观裂纹突增,组合冲击的应变特征介于二者之间.0%含水饱和度试样抵抗循环动态疲劳损伤的能力显著优于33%～100%区间,浸水对动态强度的弱化作用普遍存在,但不同冲击模式下敏感性差异明显,循环强冲击的浸水软化效应最为突出.下调冲击能量可降低RCRCS强度参量对于含水饱和度的敏感性.揭示了高应力频扰动大巷浸水煤柱频繁冲击机理:深井水仓煤柱长期处于高静载环境,浸水作用使浅部围岩初始承载阈值降低;在远场矿震与采动扰动等多次动态事件作用下,损伤持续累积并推动承载阈值逐步下移.浅部浸水区因退化快于内部干燥区而更易率先失稳,并诱发应力向核部集中,进而使后续扰动更易触发冲击地压。研究结果可为深井高应力浸水煤柱冲击地压的监测预警与针对性防治提供理论依据.

关键词:高应力;频扰动;浸水煤柱;冲击地压;发生机理
中图分类号:TD 324　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-1964(2026)03-0844-18

Study on the occurrence mechanism of frequent rock bursts in water-immersed coal pillars under deep mine and high-stress conditions

ZHANG Xiang[1], ZHU Sitao[1], WANG Aiwen[2], YAN Cai[1], DAI Lianpeng[2], WEI Xiangzhi[3], ZHANG Ming[4], WANG Bo[5]
(1. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute of Disaster Rock Mechanics, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110036, China; 3. Rock Burst Prevention and Control Department, Henan Dayou Energy Co., Ltd., Sanmenxia, Henan 472300, China; 4. National Key Laboratory of Intelligent Technology and Equipment for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 5. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

收稿日期:2025-12-23　　**修回日期**:2026-03-26　　**DOI**:10.13247/j.cnki.jcumt.20250605
基金项目:国家自然科学基金项目(52374076);中国科协青年人才托举工程项目(2021QNRC001);中国博士后科学基金资助项目(2025M781721)
第一作者:张　翔(1993—),男,山东省日照市人,讲师.E-mail:ckzhangxiang@163.com
通信作者:朱斯陶(1990—),男,湖北省荆州市人,副教授,博士生导师.E-mail:zhusitao@ustb.edu.cn
引用格式:张　翔,朱斯陶,王爱文,等.深井高应力浸水煤柱频繁冲击地压发生机理研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):844-861.
ZHANG Xiang, ZHU Sitao, WANG Aiwen, et al. Study on the occurrence mechanism of frequent rock bursts in water-immersed coal pillars under deep mine and high-stress conditions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 844-861.

Abstract: Studies on the mechanism of rock bursts in water-immersed coal pillars of high-stress main roadways triggered by recurrent disturbances remain limited, resulting in an insufficient theoretical basis for on-site prevention and control in coal mines. Taking the frequent rock bursts occurring in the water sump coal pillar of the main roadway in Zhaolou Coal Mine, Shandong Province, as the engineering background, this study employed field measurements and laboratory experiments to investigate the mechanical response and failure characteristics of rock-coal-rock composite specimens (RCRCS) with gradient water saturation under cyclic impact loading, and further explored the mechanism of frequent rock bursts in roadway coal pillars under high static load, recurrent disturbances, and continuous water immersion. The results show that the fractal dimension of coal fragments and the strain concentration range in the RCRCS increased continuously with increasing water saturation, with the most pronounced increase occurring within the range of 0%−33%. Compared with cyclic strong impacts (2.8 $m\cdot s^{-1}$) and combined strong-weak impacts (2.8/2.3 $m\cdot s^{-1}$), cyclic weak impacts (2.3 $m\cdot s^{-1}$) reduced the strength difference between dry and water-bearing states. The degree of local strain in the RCRCS increased rapidly and uniformly with the number of cyclic strong impacts, whereas under cyclic weak impacts, damage accumulated slowly in the early stage and macroscopic cracks increased sharply in the later stage; the strain characteristics under combined impacts were intermediate between the two. The resistance of specimens with 0% water saturation to cyclic dynamic fatigue damage was significantly higher than that of specimens within the 33%−100% range. Water immersion generally weakened the dynamic strength, although its sensitivity varied markedly under different impact modes, with the most pronounced softening effect occurring under cyclic strong impacts. Reducing the impact energy decreased the sensitivity of the strength parameters of the RCRCS to water saturation. The mechanism of frequent rock bursts in water-immersed coal pillars of high-stress main roadways under recurrent disturbances was revealed as follows: the deep water sump coal pillar remained under a high static load for a long period, and water immersion reduced the initial load-bearing threshold of the shallow surrounding rock; under repeated dynamic events such as far-field mine seismicity and mining-induced disturbances, damage accumulated continuously and drove the load-bearing threshold to decline progressively. Because the shallow water-immersed zone degraded faster than the inner dry zone, it was more prone to local instability first, which induced stress concentration toward the core zone and made subsequent disturbances more likely to trigger rock bursts. The results provide a theoretical basis for the monitoring, early warning, and targeted prevention of rock bursts in deep high-stress water-immersed coal pillars.

Key words: high stress; frequent disturbance; water-immersed coal pillar; rock burst; occurrence mechanism

随着我国浅部煤层可采储量的持续锐减和开采地质条件的日趋复杂化，深部资源的开采已成为我国煤炭工业发展的战略性选择[1-3]. 在这一背景下，冲击地压呈现出频率攀升、能量增强的趋势[4-7]. 然而，现有的防控体系多集中在采掘工作面，较少考虑长期服役的开拓巷道和准备巷道，导致这些区域成为防冲技术链中的薄弱环节. 大巷煤柱作为矿井通风、运输及排水系统的核心枢纽，其稳定性直接影响着矿井的整体生产流程. 因此，研究深部开采条件下大巷煤柱的冲击地压机理及防控技术，已成为我国煤矿安全领域亟待解决的重大科学问题.

我国众多学者围绕大巷煤柱冲击地压领域开展了较为深入的研究. 文献[8]应用矩张量反演方法解析了大巷煤柱区域矿震事件的震源破裂机制，认为高能级矿震主要由高应力煤体剪切破坏产生；文献[9]系统研究了深部大巷硐室群围岩失稳现象，提出了连锁失稳的力学判别准则与触发机制；

文献[10]指出厚硬顶板挠曲加载效应与深部煤体时变行为共同作用,会导致大巷附近孤立煤体静载高度集中,顶板破裂释放的动载荷可诱发冲击地压启动;文献[11-12]揭示了近直立煤岩层层裂压曲破坏诱冲机理,并且基于冲击机理设计了针对性的应力调控方法;在冲击地压防治方面,文献[13]提出了大巷煤柱区域性顶板超长钻孔分段水力压裂防冲方法,文献[14-15]提出了大巷煤柱“压裂-注浆”协同防治技术,现场实践取得了较好防冲效果.现有研究从诱冲因素、冲击机理、防冲技术等方面深化了大巷煤柱冲击地压的认识,但是针对长期浸水与频繁扰动联合作用下高应力大巷煤柱的冲击失稳问题仍缺乏系统研究.

长期浸水与频繁扰动均为高应力大巷煤柱隐蔽致冲的重要影响因素,针对含水煤/岩材料在高应变率条件下的冲击力学响应,国内外已开展了大量分离式霍普金森压杆(SHPB)试验研究.文献[16-17]认为水分参与将显著影响岩石的动态响应特征、渐进损伤过程及破坏模式;文献[18-20]围绕循环冲击及静载-循环冲击耦合作用下岩石动态行为与能量演化开展了研究,指出反复扰动条件下岩石力学响应与能量耗散过程具有明显的累积演化特征;文献[21-23]从重复冲击、渐进载荷循环冲击等角度,分析了岩石动态损伤、破坏行为及能量耗散规律;文献[24]在冲击倾向性评价中将岩体质量与开挖扰动因素纳入指标体系,判断扰动条件是影响围岩冲击危险性的重要因素.现有研究为认识富水条件下煤岩体的动力响应与失稳特征提供了重要基础,但是对于长期浸水与频繁扰动合并考虑的试验研究仍显不足.

本文以山东省赵楼煤矿南部大巷水仓煤柱为研究背景,采用现场监测、室内试验与理论分析等手段,以0%~100%梯度含水饱和度岩-煤-岩组合试样(RCRCS)模拟浸水渗透范围内不同深度的围岩含水状态,采用SHPB循环冲击加载用于表征远场矿震在煤柱近场介质中形成的短时应力波作用及其疲劳效应,系统揭示高静载-频扰动-恒浸水环境下大巷浸水煤柱频繁冲击的发生机理,从而为此类大巷煤柱冲击地压的监测预警与防治提供理论依据.

1 大巷浸水煤柱频繁冲击案例

1.1 工程地质概况

赵楼煤矿位于山东省菏泽市巨野煤田中部,矿区内部的开拓及准备巷道、永久硐室系统由南部大巷、七采区大巷和一集下山三部分系统组成,而本文的研究对象位于南部大巷与七采区大巷上段的相交处,如图1所示.南部大巷水仓煤柱由7#联络巷、8#联络巷、内水仓、南部辅运大巷和南部胶带大巷切割形成,其中内水仓与外水仓是全矿蓄水、沉淀和储水的中心枢纽,水仓煤柱平均埋深、长度、宽度、煤厚和倾角分别约为980,89.4,21.5,6.5 m和8.5°.受煤层赋存影响,水仓煤柱四周巷道存在局部穿层和留底煤设计,7#与8#联络巷、南部辅运与胶带大巷、内水仓巷道内最大底煤厚度分别约为3.2,1.1,2.3,6.7,2.1 m.

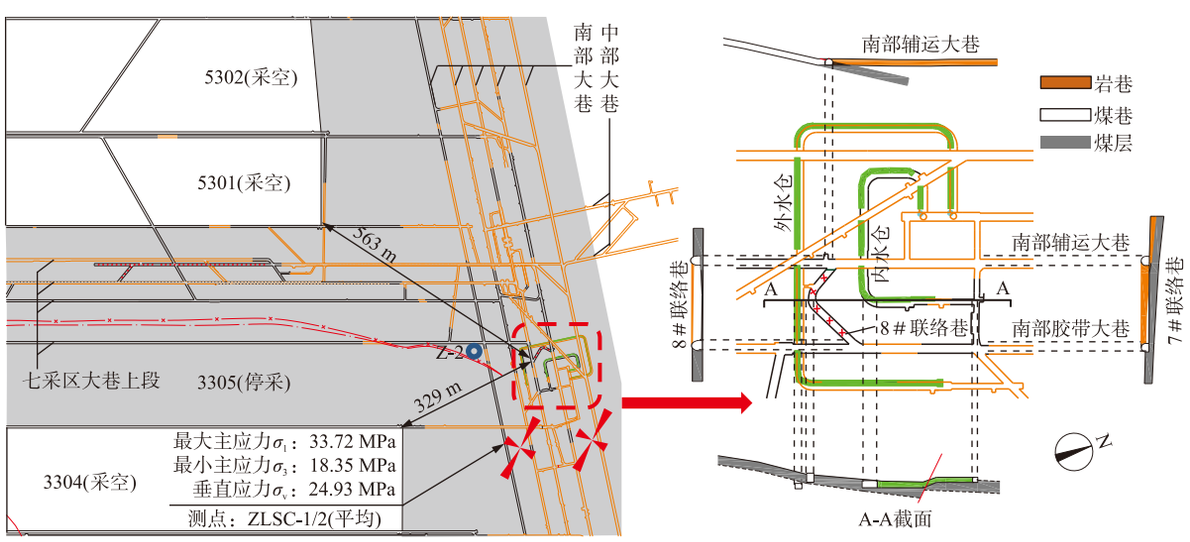


图1 大巷浸水煤柱的平面位置与巷道布置情况

Fig. 1 Plane position and roadway layout of submerged coal pillar in roadway

经现场地应力测试，水仓煤柱附近区域最大水平主应力 σ_H、最小水平主应力 σ_h 和垂直主应力 σ_v 量值区间分别为 30.71～36.73 MPa、17.05～19.65 MPa 和 24.59～25.27 MPa，其中最大主应力方向为 105.16～126.01°(NWW)；经冲击倾向性鉴定，判定赵楼煤矿 3#煤层顶、底板岩层弯曲能量指数分别为 113.38，102.94 kJ，均属于Ⅱ类弱冲击倾向性岩层，3#煤层属于Ⅱ类弱冲击倾向性煤层，其平均单轴抗压强度为 8.55 MPa.

1.2　冲击显现特征

2012 年 7 月 3 日，2018 年 2 月 11 日，2020 年 2 月 5 日，2022 年 2 月 8 日显示，南部大巷水仓附近区域发生多次冲击显现，具体信息见表 1，SOS 微震系统监测历次冲击震源分别为 1.6×10^4，2.2×10^4，1.9×10^4，2.6×10^4 J，如图 2 所示，震源分布位置与显现破坏范围集中在水仓煤柱四周，现场破坏特征主要包括底板变形隆起、浆皮开裂掉落、锚杆崩断失效、设备倾倒损坏等局部显现. 2018 年以来针对水仓煤柱采取多轮常规卸压措施(断层扰动爆破、煤层钻孔卸压和重复掏孔)均无明显效果，2023 年 6 月 8 日联络巷使用 C30 砼浇筑充填处理. 临近采场回采情况为：五采区 5301～5305 工作面回采时间区间为 2013 年 11 月—2024 年 7 月，采空区至水仓煤柱最小距离约 563 m；七采区 3301～

表 1　大巷浸水煤柱附近区域历次冲击显现统计

Table 1　Statistics of previous impact appearances in the area near the water-immersed coal pillar in the main roadway

编号	时间	最大能量/J	现场破坏情况
1	2012-07-03	1.6×10^4	SOS 微震监测本次冲击震源位于南部大巷 8#联络巷附近. 现场反馈破坏模式以巷道底鼓显现为主：南部辅运大巷与－945 内环水仓立交处 11.5 m 水沟破坏，5.5 m 轨道弯曲脱轨；8#联络巷内南部胶带大巷方向 20 m 区间硬化路面底鼓约 400 mm，交叉口向东 18 m 铁路底鼓，H 架不同程度歪斜，两辆车皮掉道.
2	2018-02-11	2.2×10^4	SOS 微震监测南部大巷 8#联络巷附近区域连续发生 8 次大能量微震事件，同时应力监测应力值最大升幅 16.5%. 现场反馈破坏模式以顶板浆皮开裂显现为主：8#联络巷全段、两侧三岔口区域及南部辅运大巷向西 40 m 区域均存在不同程度顶板浆皮开裂掉落显现.
3	2020-02-05	1.9×10^4	SOS 微震监测本次冲击震源位于内水仓与南部胶带大巷之间的孤立煤体中部. 现场反馈 8#联络巷与南部胶带大巷三岔口以北 20 m 范围内明显底鼓(平均底鼓量 0.2 m)，同时该范围内顶板浆皮开裂、煤矸掉落情况严重，一台开关受震动影响倾倒，1 处帮部底角锚杆弹射崩出；南部胶带大巷三叉口位置皮带架受震动影响倾斜，4 处上托辊从卡槽处弹出、掉落，三叉口以东 10 m 范围内皮带里帮 4 处帮部锚杆崩出掉落；三叉口处 5 m 范围内北帮顶板破坏明显.
4	2022-02-08	2.6×10^4	SOS 微震监测本次冲击震源位于内、外水仓之间的孤立煤体中部. 现场反馈水仓硐室局部顶帮浆皮开裂掉落，同时变电所硐室底鼓开裂.

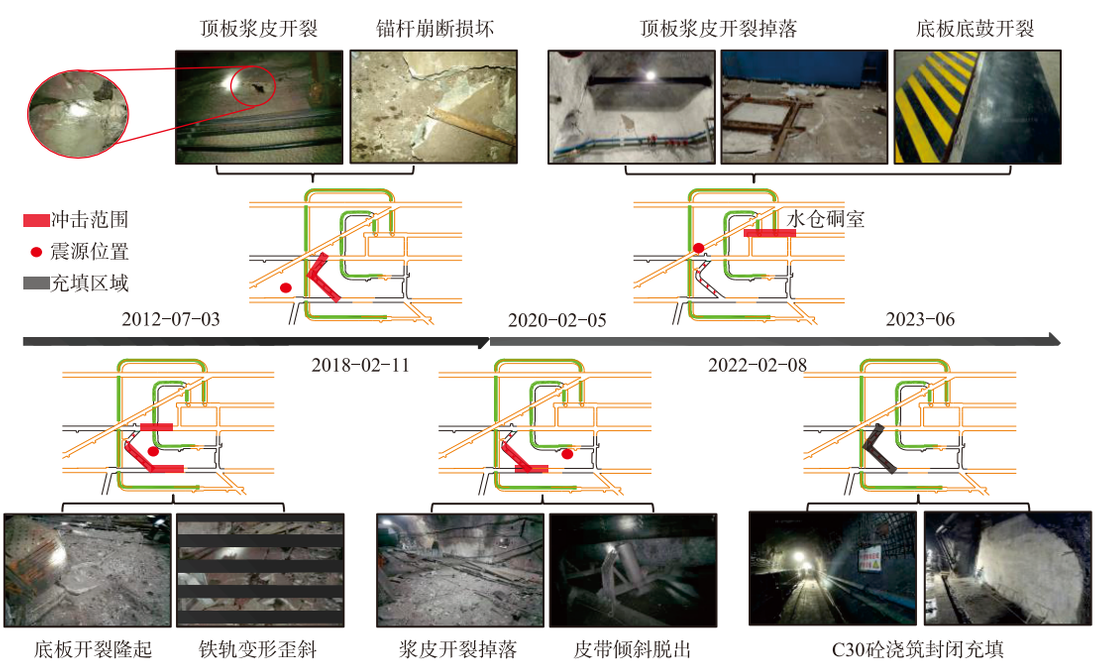


图 2　大巷浸水煤柱附近区域历次冲击地压现场实摄

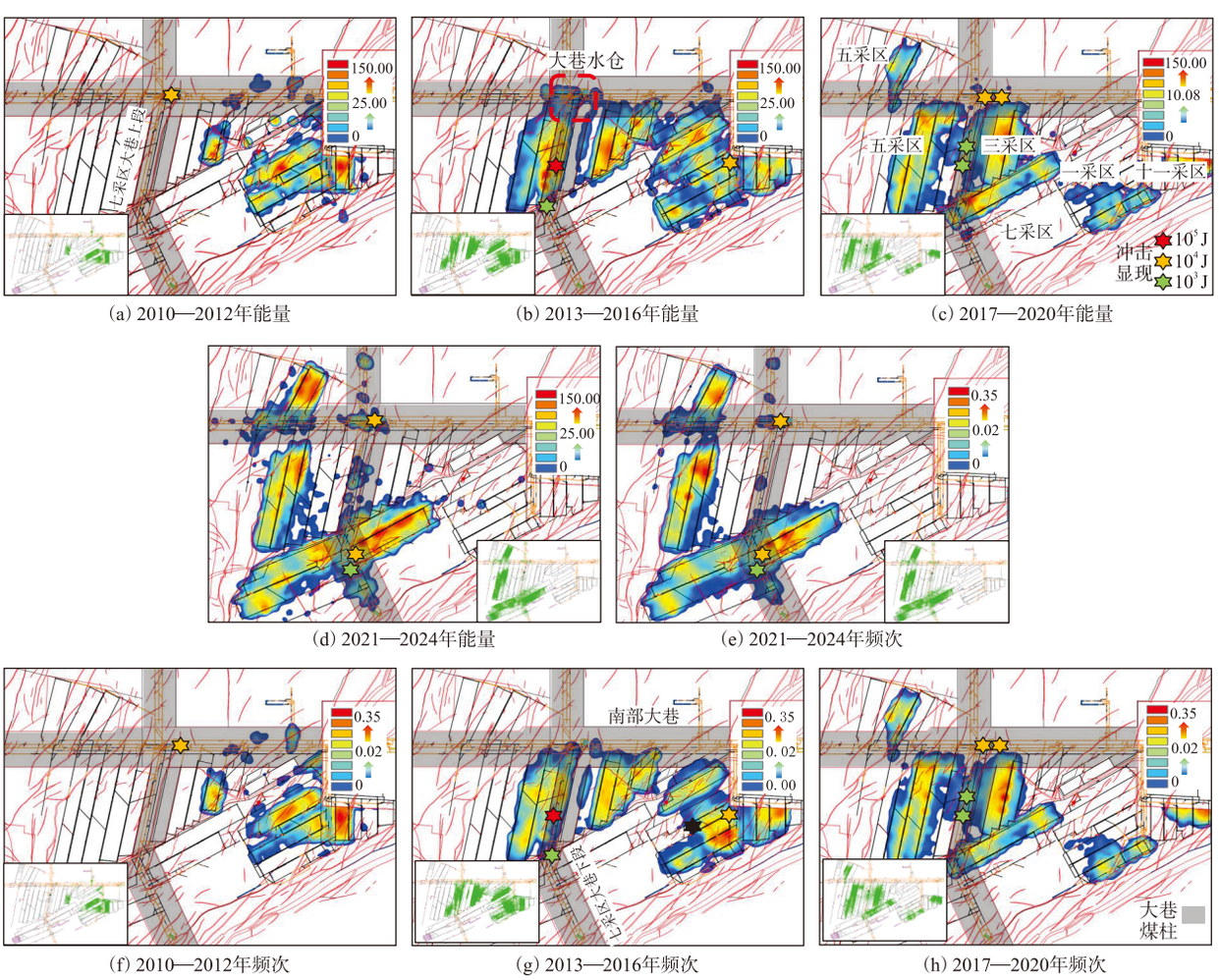
Fig. 2　Field shooting of previous rock bursts in the area near the water-immersed coal pillar in the main roadway

3304 工作面回采时间区间为 2012 年 8 月—2018 年 3 月，采空区至水仓煤柱最小距离约 329 m，根据笔者团队在巨野煤田多个矿井监测分析结果（工作面直接采动影响区间为 200～300 m），判断水仓煤柱历次冲击显现与近场工作面采动不存在直接对应关系，并且排除断层构造、地层相变等其他附加应力影响因素．水仓煤柱虽然位于采动直接影响区之外，但是在回采期间仍可能受到远距离传播的矿震波动长期作用．

1.3 微震监测分析

统计赵楼煤矿 2010 年 1 月至 2024 年 12 月期间所有 SOS 微震系统监测微震事件，绘制全矿平面微震能量、频次累计分布核密度云图，微震事件分布核密度是指在选定统计时段内，将各微震事件能量、频次在空间上进行累积叠加，并采用核密度估计获得连续化分布场，用以表征研究区域微震能量、频次释放强度的空间集聚特征．联合分析赵楼煤矿大巷煤柱历年冲击显现的震源能量强度和平面发生位置，如图 3 所示，从时间序列角度研究高应力大巷煤柱的能量释放规律．

以 4 a 为划分单元进行时间序列的微震能频密度分析，为便于对比分析，统一所有划分单元的能频密度卡尺，根据冲击显现地点与微震能频密度分布区域的位置关系，判断大巷煤柱冲击地压存在“直接型”和“间接型”2 种类型，其中“直接型”冲击点分布在采掘扰动产生的微震活跃范围内，并且震源强度同附近采场能频密度量值呈正相关性，例如七采区大巷上段保护煤柱历次冲击震级与频次随着五采区顺序接续（5301→5305）逐渐降低（10^5 J→10^3 J）；“间接型”冲击点孤立在采掘扰动产生的微震活跃范围外，其显现时序与近场采动强度无稳定对应关系，例如南部大巷同七采区交叉口区域的水仓煤柱历次冲击震源恒定保持在 10^4 J 能级，多次冲击显现时附近均无采掘活动．



(a) 2010—2012年能量　(b) 2013—2016年能量　(c) 2017—2020年能量

(d) 2021—2024年能量　(e) 2021—2024年频次

(f) 2010—2012年频次　(g) 2013—2016年频次　(h) 2017—2020年频次

图 3　大巷煤柱历年采场微震事件能量-频次核密度云图

Fig. 3　Energy-frequency density cloud diagram of microseismic events with different energy levels in main roadway coal pillar

对比各个采区回采期间的南部大巷水仓煤柱微震能量与频次密度云图，可知三采区与五采区回采期间，大巷水仓煤柱附近区域的微震事件能量释放强度与发生频次均呈现显著的升高趋势，并且该区域冲击地压显现的频率同步增加，判断虽然大巷水仓煤柱宏观上位于采场的直接影响区之外，但远距离传输的矿震扰动波动可作为低能多次的外部动载触发源，在煤柱围岩因高静载与浸水作用已发生持续强度弱化、承载阈值降低的背景下，进一步加速疲劳损伤与阈值退化，从而提高失稳冲击发生概率. 因此，远场矿震能量与频次表征了该类冲击的触发与加速条件，评价长期服役的大巷浸水煤柱冲击危险性时，应综合分析其强度弱化水平及远场矿震扰动强度.”

2　频扰动–恒浸水煤柱力学试验方案

考虑浸水环境中承载煤柱内部不同深度的含水率具备明显差异，同时承载煤柱失稳冲击是顶板-煤层-底板组合作用的结果，顶板、底板浸水同样会影响煤柱整体结构的强度特征，所以设计梯度含水饱和度的岩-煤-岩组合试样方案. 结合大巷浸水煤柱所处的扰动应力环境，本文针对RCRCS开展SHPB循环冲击试验，在材料尺度上模拟远场矿震应力波到达煤柱近场后的瞬态动载作用，并通过循环次数与能量耗散统计揭示其累积疲劳损伤与强度阈值退化规律. 需要强调的是，SHPB试验的加载间隔由设备与测试流程决定，无法与现场矿震日/月尺度的触发间隔一一对应；因此本文以单次冲击的应力幅值与应变率表征扰动强度，以循环次数/耗散能表征累积效应.

2.1　梯度含水饱和度试样设计

试验所用原煤与砂岩样品（顶、底板）取自赵楼煤矿七采区7303工作面回风顺槽，现场将完整性较好且未经风化的煤岩样蜡封后运回试验室，经切割制备获得高度16 mm、直径50 mm的标准圆柱体试件（顶板-煤层-底板系列）. 依据国际岩石力学学会（ISRM）标准化测试规范，对试样的上下两端面进行打磨，实现端面平面度偏差小于±0.05 mm，轴向垂直度误差小于±0.25°的精密制备要求. 为提升试验数据可靠性，试样均源自整块母体材料（煤/岩芯），并运用ZT801型超声波检测仪（莱拓高科制）进行波速测试，筛除波速异常的试样以保证试样波速特征相近.

设计0%，33%，66%和100%含水饱和度S_w的RCRCS，含水分级为基于试样整体质量法得到的RCRCS整体平均含水饱和度，用于表征等效浸水弱化程度，并不等同于现场煤体局部或者分层含水率. 制作流程如图4所示. ①将标准试样放置于烘干箱中110℃烘干直至其质量不再降低；②使用环氧树脂胶粘合顶板、煤层、底板试样形成RCRCS，然后将RCRCS放至纯净水中长期浸泡，持续针对RCRCS质量进行测量直至其质量保持稳定水平；③记录RCRCS含水率-浸泡时间变化曲线，反向计算得出RCRCS达到0%，33%，66%和100%含水饱和度所需要的浸水时长分别为0，48，1 506，6 580 min；④将完全烘干的RCRCS根据步骤③反算得出的梯度浸水时间进行对应时长浸泡处理，共加工0%，33%，66%和100%含水饱和度的RCRCS数量60个，每种含水饱和度梯度15个.

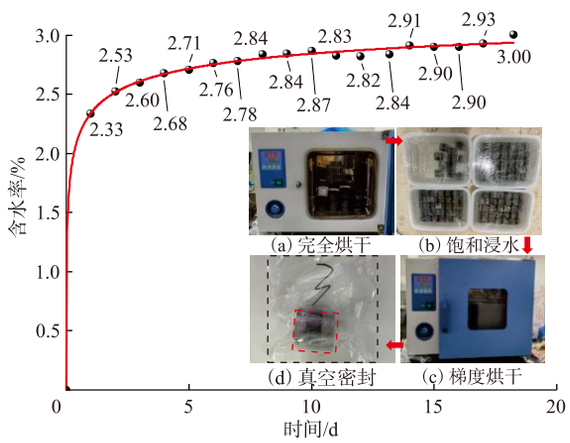


图4　梯度含水饱和度RCRCS制作流程

Fig. 4　Gradient water saturation RCRCS production process

2.2　循环冲击力学试验设计

循环冲击力学试验通过阿基米德工业科技有限公司开发的SHPB试验系统进行，如图5，试验设计内容包括SHPB系统选型、应力平衡验证与冲击试验设计，各项内容设计细节如下：

1）SHPB系统选型. 主要包括加载驱动系统、数据采集系统、DIC监测系统和压杆撞击系统，各个组成部分的结构单元与性能参数如下：

①加载驱动系统：主要包括高压氮气瓶、气压控制阀、高压气室、发射室等组成单元.

②数据采集系统：主要包括Yokowaga-DL850E型示波记录仪、BX120-2AA应变片、接线桥盒、SDY2107A超动态应变仪等组成单元.

③DIC监测系统：选用Fastcam SA-Z高速摄像机（最高帧频2 100 000 fps，感光度ISO50000（单色）），利用LED日光灯提供光源.

④压杆撞击系统：主要包括冲头、入射杆、透

射杆、吸能装置等组成单元，压杆与冲头材料为48CrMn，密度为7 800 kg/m^3，弹性模量为210 GPa，纵波波速为5 000 m/s，屈服强度为2.1 GPa. 入射杆、透射杆结构尺寸规格分别为∅50 mm×3 700 mm、∅50 mm×2 500 mm，冲头为纺锤形并且最大截面积直径与轴向长度分别为50，300 mm.

2)应力平衡验证. 冲击试验过程中，试件在破坏前两端应力能否达到平衡决定了试验结果是否可靠，因此有必要对应力平衡性进行验证. 图5显示了试件两端的应力平衡情况，入射应力与反射应力之和与透射应力基本相等，试件两端应力平衡可以得到满足，因此所得试验结果具有可靠性.

3)冲击试验设计. 为保证压杆-试样接触连续性并模拟煤柱长期承载背景，循环冲击过程中对试样施加并维持轴向恒定压应力0.4 MPa(恒静载项)；同时通过不同冲击速度与循环次数施加多次短时动载扰动(频扰动项). 旨在研究恒静载约束下循环动载导致的结构强度阈值退化规律. 共设计3种循环冲击试验方案：循环弱冲击、循环强冲击、组合强度冲击. 采用试冲法确定循环冲击幅值(0%含水饱和度)，结合目前的研究经验、文献资料和试验室设备局限等因素，在满足循环冲击次数阈值(≥3次)的约束条件下，最终标定2.3、2.8 m/s分别作为弱、强冲击方案的目标冲击速度，循环冲击直至RCRCS破碎水平不能满足再次撞击条件(两侧压杆无法稳定夹持). 设计的梯度含水饱和度RCRCS冲击试验分组与编号见表2.

为确保杆件与试样的接触连续性，需在RCRCS接触端面均匀涂抹凡士林润滑介质，并使顶板端部与入射杆紧密贴合. 采用亚光白漆对试件表面进行底涂处理，使用黑色马克记号笔在喷涂表面进行数字散斑绘制，为后续DIC识别做准备. 设置高速摄像机以384×384像素分辨率、100 000 fps采样频率的成像参数记录RCRCS动态冲击位移响应过程.

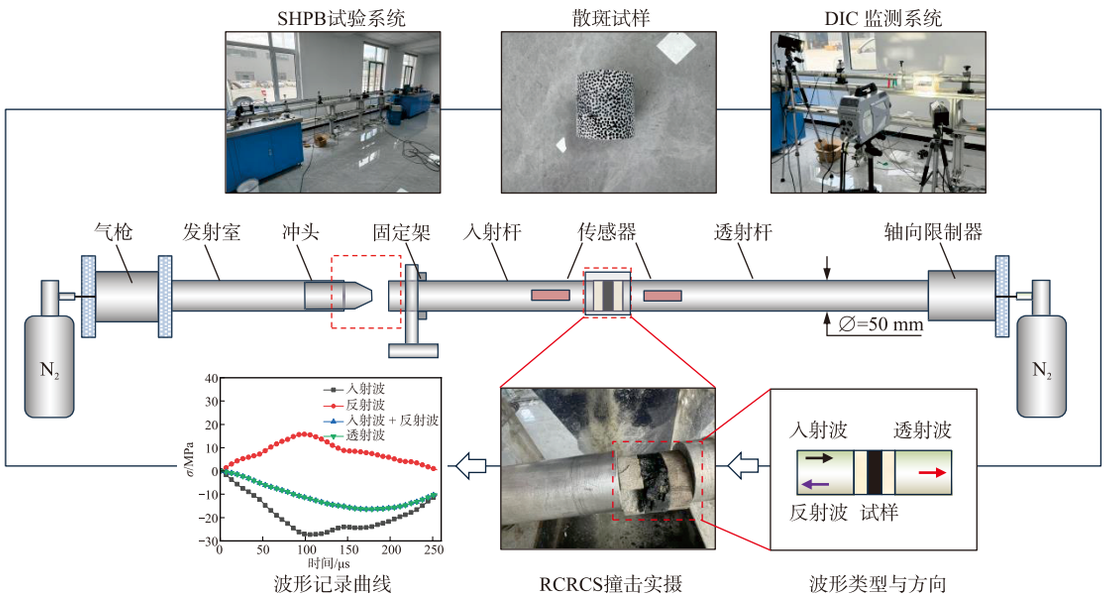


图5 SHPB循环冲击梯度含水饱和度RCRCS试验系统与监测设备布置

Fig. 5 SHPB cyclic impact gradient water saturation RCRCS test system and monitoring equipment layout

表2 循环冲击RCRCS分组与编号

Table 2 Cycle impact RCRCS grouping and numbering

分组	含水饱和度/%	平均重量/g	平均高度/mm	冲击速度/(m·s^{-1})	编号	分组	含水饱和度/%	平均重量/g	平均高度/mm	冲击速度/(m·s^{-1})	编号
A	0	615.93	48.78	2.8	1,2,3	C	66	628.89	48.91	2.8	1,2,3
		614.55	49.02	2.3	4,5,6			629.46	48.99	2.3	4,5,6
		615.03	49.05	2.3/2.8	7,8,9			626.61	49.02	2.3/2.8	7,8,9
B	33	621.75	49.06	2.8	1,2,3	D	100	630.75	48.96	2.8	1,2,3
		625.26	49.04	2.3	4,5,6			630.12	49.89	2.3	4,5,6
		625.17	49.02	2.3/2.8	7,8,9			630.45	48.93	2.3/2.8	7,8,9

3　频扰动–恒浸水煤柱结构破坏特征

3.1　碎块分形特征分析

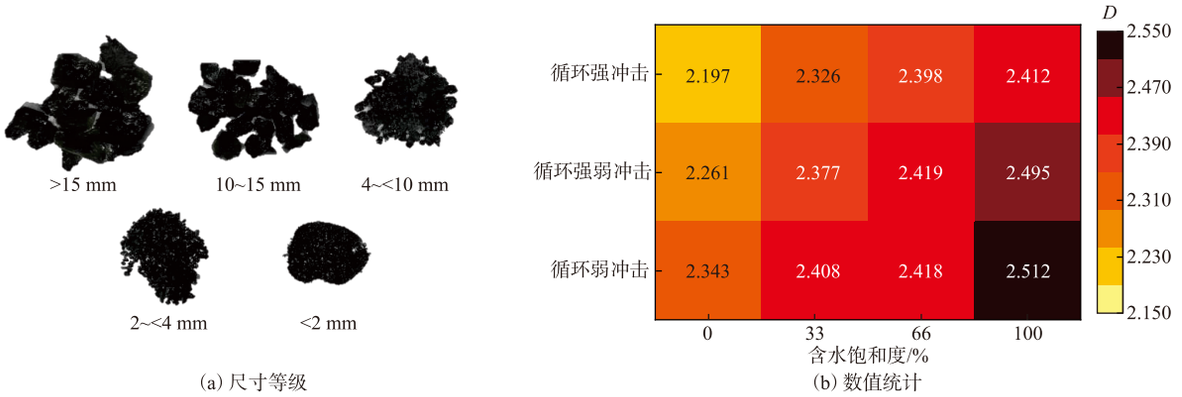
煤体破碎后的分形维数可直观定量反映煤岩体的破碎程度，碎块分形维数越大，说明破碎程度越高，破碎尺寸越小，损伤程度越强．试样破碎后块度分布的分形维数计算函数可用式(1)表示：

$$D=3-\frac{\ln(k)}{\ln(r)},\tag{1}$$

式中：r为试样破碎后块度的最大尺寸；k为直径小于r的质量分数．

考虑梯度含水饱和度RCRCS动态冲击试验时破坏层位主要集中在中部煤层，所以确定分形维数的研究对象为RCRCS煤层部分，假设破碎后的煤体碎块密度恒定，可采用筛分法测试RCRCS中部煤层碎块的质量，将试验后的煤层碎块用2，4，10，15 mm的标准筛筛分处理，从而将RCRCS煤层碎块划分为0～<2 mm，2～<4 mm，4～<10 mm，10～15 mm，>15 mm共计5个尺寸等级，如图6a，通过高精度电子秤称重不同尺寸等级的碎块总质量，最终将统计参量代入式(1)即可得到对应的RCRCS煤层碎块分形维数．重复上述流程，见图7，分别得到循环强冲击、循环弱冲击、循环强弱组合冲击条件下RCRCS破碎煤块的分形维数，每种冲击模式下涵盖0%，33%，66%，100%共4种梯度的含水饱和度RCRCS．

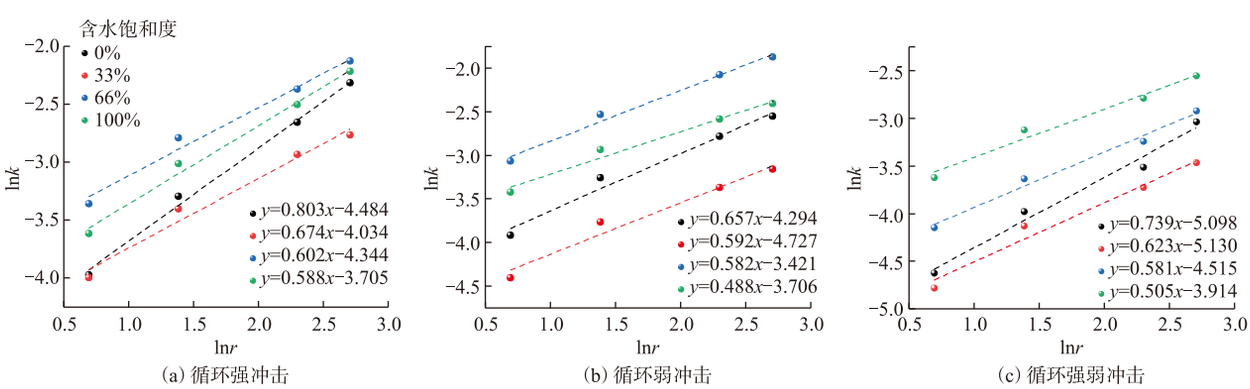
汇总统计3类冲击模式下的梯度含水饱和度RCRCS破碎煤块的分形维数，如图6b，可知所有冲击模式下的分形维数D均与RCRCS含水饱和度呈正相关，并且0%→33%区间升幅幅度明显高于其余区间，循环弱冲击、循环强弱冲击、循环强冲击加载模式对应的0%～<33%，33%～<66%，66%～100%含水饱和度区间升幅为(2.7%，2.1%，2.2%)，(6.1%，1.9%，3.1%)，(8.2%，1.5%，2.1%)，可知RCRCS损伤程度随着含水饱和度的梯度增长持续升高，其中含水饱和度0%→33%区间劣化水平快速增长，含水饱和度33%→100%区间增速趋缓接近稳定状态．



(a) 尺寸等级　　(b) 数值统计

图6　循环冲击梯度含水度RCRCS分形维数统计

Fig. 6　Statistics of fractal dimensions of RCRCS under cyclic impact and gradient water saturation



(a) 循环强冲击　　(b) 循环弱冲击　　(c) 循环强弱冲击

图7　循环冲击RCRCS破碎煤块分形维数计算曲线

Fig. 7　Calculation curve of fractal dimension of crushing block of cyclic impact RCRCS

对比发现冲击模式能够显著影响RCRCS破碎煤块的分形维数，总体表现为循环强冲击、循环强弱冲击、循环弱冲击分形维数D依次升高，同时相对于其他两类加载模式，循环弱冲击能够显著升高0%含水饱和度RCRCS损伤程度，进而降低0～33%区间的分形维数升幅水平．推测循环强冲击模式导致冲击能量集中释放，继而瞬间破坏煤块整体结构，后续碎片因缺乏持续细化过程而保持较大尺寸；循环弱冲击模式通过逐步累积微裂纹，使煤块内部形成密集的裂纹网络，导致材料从内部逐渐瓦解，而循环强弱冲击模式的破碎程度介于前两者之间．

3.2 应变演化趋势分析

动态冲击条件下的煤岩组合试样裂隙发育扩展机制与破碎位移演化特性对于研究煤柱的宏观强度、失稳特征具有重要意义．利用Matlab、PhotoInfor与Post Viewer数字图像前后处理软件，提取RCRCS表面散斑的运动轨迹，设置试验前RCRCS初始散斑位置作为参考基准，选取冲击加载过程典型时刻的散斑位置作为对比参量，绘制试验过程中RCRCS的表面应变、位移图像．考虑设计动态冲击试验的加载模式与循环次数较多，同时为提高研究变量的针对性，仅提取冲击过程中动态峰值应力对应时间的应变云图进行集中分析，图8～10分别为循环弱冲击、循环强冲击和循环强弱交替冲击模式条件下梯度含水饱和度RCRCS的动态峰值应变云图．

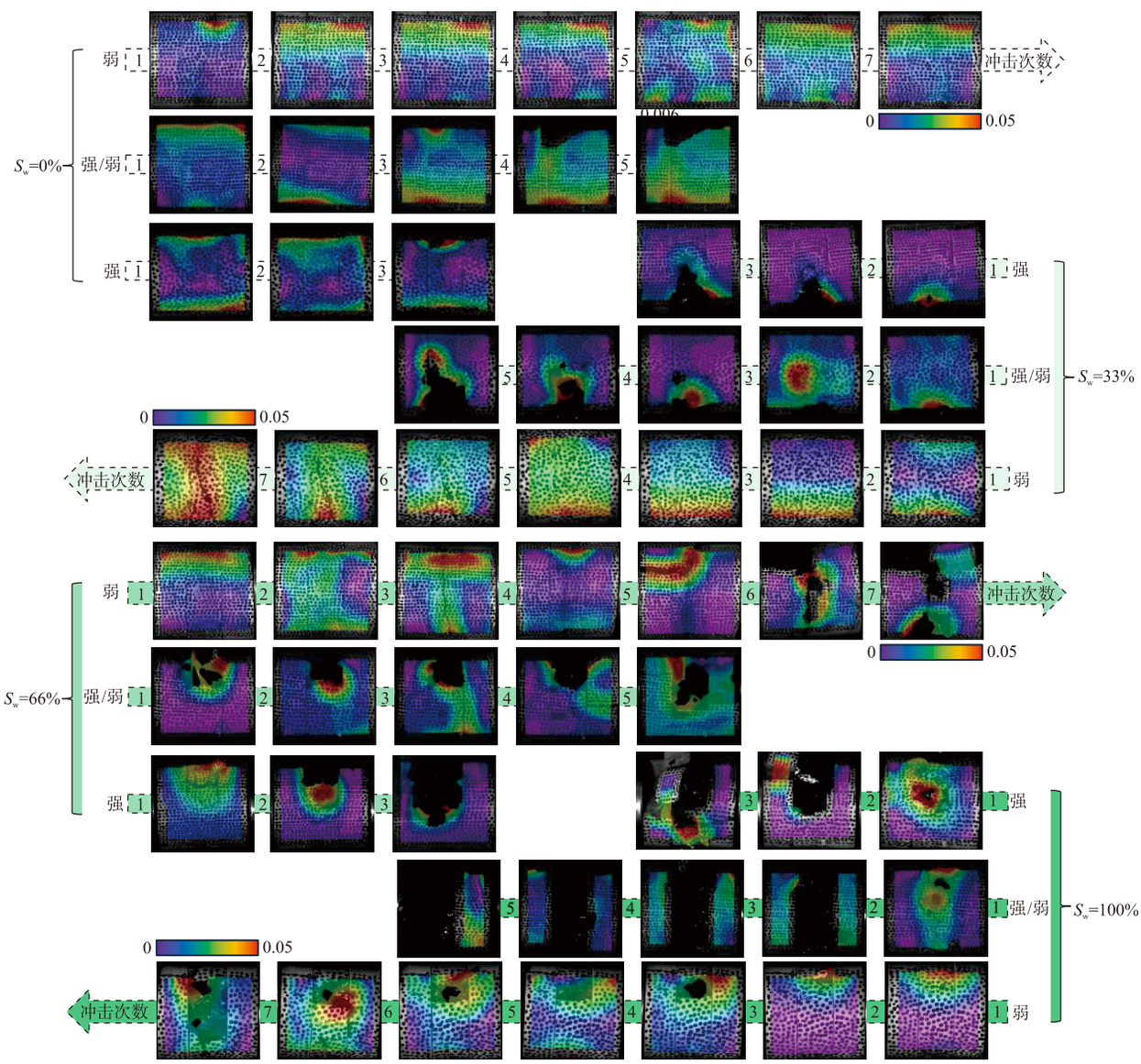


图8 不同循环冲击模式下梯度含水饱和度RCRCS动态峰值应变云图

Fig. 8 Dynamic peak strain nephogram of gradient water saturation RCRCS under different cyclic impact modes

以下分别基于循环冲击次数、含水饱和度梯度和循环冲击加载模式3种对比变量针对RCRCS的动态峰值应变云图展开系统分析：

1）循环冲击次数

统计发现所有RCRCS动态峰值应变高水平区域集中分布在中部煤层，并且数值与范围整体上逐次增长，同时应变云图的数值水平与集中范围同RCRCS破坏程度和分布区域基本对应，以循环强冲击33%含水饱和度RCRCS为例，如图9，历次撞击应变集中位置较为固定，同时逐次继续向RCRCS中部扩展蔓延，不会产生其他的孤立应变突增区域，可知对于高应力煤岩柱的局部破碎薄弱区域应及时补强注浆、支护等措施，否则频扰动弱化条件下围岩损伤范围将迅速扩展至核部中心区域继而影响煤柱整体的承载能力．

2）含水饱和度梯度

对比发现0%，33%，66%，100%含水饱和度RCRCS应变云图的数值水平与集中范围整体呈现递增趋势，以循环弱冲击梯度含水饱和度RCRCS为例，如图8，首次冲击100%含水饱和度RCRCS即出现宏观破坏，而0%～66%区间均无明显裂纹产生，同时应变集中面积表现为单调递增规律，此后循环冲击中RCRCS宏观破坏首次出现次数以及应变发育程度同其含水饱和度梯度正相关，统计的7次冲击过程中0%含水饱和度均无宏观裂纹产生，33%和66%含水饱和度贯通裂纹出现的次数分别为第5次和第3次循环冲击，判断浸水环境显著弱化了RCRCS局部原生裂隙位置的煤体强度继而影响整体强度，其抵御扰动破坏能力同其含水饱和度负相关．

3）循环冲击加载模式

研究可知不同加载模式的RCRCS破碎程度同冲击次数、含水梯度具备不同的联动规律．冲击次数方面，RCRCS局部破碎程度随着强冲击循环次数增加整体快速均匀增长，循环弱冲击模式下RCRCS前期裂纹缓慢累积后期宏观裂纹突增甚至整体破碎，循环强弱冲击的破碎程度增长趋势介于二者之间．含水梯度方面，循环强冲击、循环强弱冲击模式下的0%含水饱和度RCRCS应变水平显著低于33%～100%，而循环弱冲击模式下的破坏程度呈现较为平缓的梯度过渡趋势，判断循环弱冲击能够降低RCRCS干燥状态同浸水状态的强度差距，同时强冲击在低含水试样中表现出更高的破坏效率；而弱冲击作用下，高含水条件更易促使损伤逐步累积并加速演化，从而更快达到临界失稳状态．

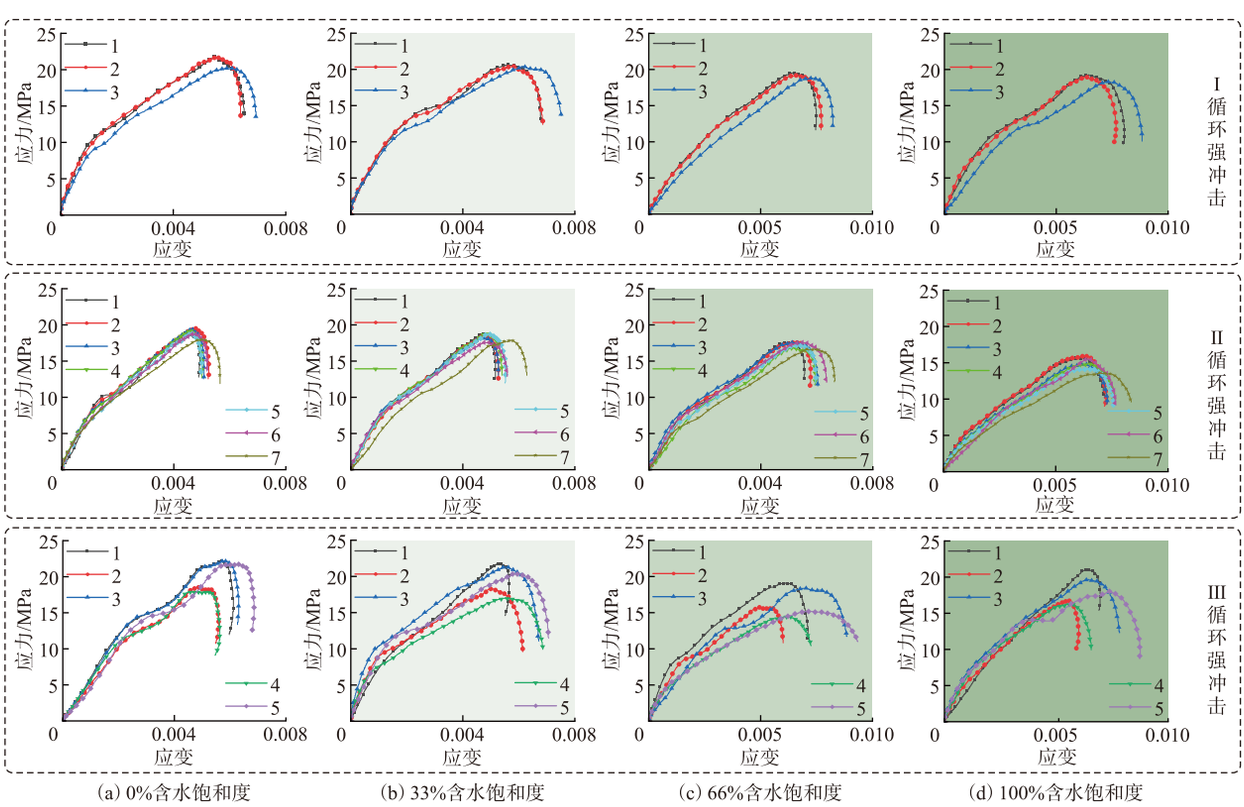


图9　梯度含水饱和度RCRCS循环强、弱、强弱冲击应力-应变曲线

Fig. 9　Gradient water saturation RCRCS cycle strong, weak, strong and weak impact stress-strain curve

4 频扰动-恒浸水煤柱强度弱化规律

4.1 循环冲击应力-应变曲线

冲头撞击RCRCS使其变形破坏，通过入射杆与透射杆上的应变片分别获取入射波$\varepsilon_i(t)$、透射波$\varepsilon_t(t)$、反射波$\varepsilon_r(t)$信号，计算对应的应力-应变曲线：

$$\begin{cases}\sigma(t)=\dfrac{A}{2A_s}E\left[\varepsilon_i(t)+\varepsilon_r(t)+\varepsilon_t(t)\right],\\ \varepsilon(t)=\dfrac{C}{L}\displaystyle\int_0^t\left[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t)-\varepsilon_t(t)\right]\mathrm{d}t,\\ \dot{\varepsilon}(t)=\dfrac{C}{L}\left[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t)-\varepsilon_t(t)\right],\end{cases}\tag{2}$$

式中：A为压力杆的横截面积；A_s为RCRCS的横截面积；C为压力杆的波速；E为压力杆弹性模量；L为煤岩组合体的长度；t为应力波在压力杆中的持续时间；$\sigma(t)$，$\varepsilon(t)$，$\dot{\varepsilon}(t)$分别为RCRCS的应力、应变、应变率.

取100%含水饱和度RCRCS的平均冲击次数作为所有梯度循环冲击次数的分析标准，根据式(2)计算获得3次循环强冲击、7次循环弱冲击、5次循环强弱冲击方式下的梯度含水饱和度RCRCS应力-应变曲线，选择代表性的循环冲击-梯度浸水组合的计算曲线如图9所示，所有应力-应变曲线趋势基本相同，大致可以分为3个特征阶段：①弹性阶段：煤岩组合样内部微裂隙不断张开闭合，在此阶段煤岩组合样仍保持弹性变形，曲线基本为线性.②塑性阶段：随着冲击气压或者冲击次数的增大，RCRCS内部微裂隙不断发育，试样体积开始膨胀，强度达到峰值，曲线变为凹形.③应力下降或破裂阶段：RCRCS因冲击结束或内部微裂隙进一步扩展并贯通，强度出现下降，曲线曲率变为负值.

4.2 循环冲击特征参数对比

基于冲击试验全过程中的RCRCS应力-应变曲线，统计3类循环冲击加载模式下梯度含水饱和度RCRCS的动态峰值强度、能量耗散和弹性模量，对比分析不同含水饱和度、不同循环加载模式对于RCRCS整体的强度弱化规律.

1) 动态峰值强度统计

(1)单一循环冲击模式RCRCS动态强度演化趋势.循环冲击试验时动态峰值强度整体呈现逐次小幅度降低直至末次突降(相同冲击幅值)的变化趋势，如图10a，但是存在零星末次强度无明显变化并且移动入射杆时RCRCS中部煤层整体突然粉碎的情况.判断由于设置冲击能量较低导致单次冲击不能发育规模可观的宏观裂隙，但是频繁冲击产生的“疲劳损伤”逐次叠加引起RCRCS动态强度平缓下降.当末次冲击能量远远超过“频扰动”RCRCS稳定阈值后，即发生强度突降并且直接失稳破坏.当末次冲击能量接近“频扰动”RCRCS稳定阈值时，由于轴压限制导致试样维持临界稳定状态，表现为末次强度继续小幅度降低，随后的轻微扰动即可诱发RCRCS整体失稳.

(2)梯度含水饱和度RCRCS动态强度对比特征.整体上含水饱和度梯度与RCRCS的动态峰值强度顺序基本一致，但是0%含水饱和度峰值强度水平与下降速度范围均与33%～100%存在明显差距，以循环低强度冲击为例，如图10a2所示，0%，33%，66%，100%含水饱和度对应的首次冲击动态峰值强度分别为18.99，17.55，17.22，16.62 MPa，末次冲击动态峰值强度分别为18.37，16.19，15.95，13.74 MPa，同时排除末次冲击的平均峰值强度下降速度分别为0.10，0.28，0.32，0.42 MPa/次，判断0%含水饱和度RCRCS抵抗循环动态疲劳损伤的能力显著高于33%～100%区间.

(3)循环冲击模式RCRCS动态强度对比特征.统计发现浸水对于RCRCS动态强度的弱化作用普遍存在，然而不同冲击模式下敏感性差异显著，其中循环强冲击模式的浸水软化效应最为突出，循环弱冲击模式主要依赖累积损伤，而循环强弱组合冲击介于二者之间，例如循环强冲击、循环弱冲击、循环强弱冲击试验中末次冲击的梯度含水饱和度RCRCS平均峰值降幅分别为0%～33%区间为16.78%、8.82%、9.54%，33%～66%区间为5.85%、3.46%、5.22%，66%～100%为6.85%、2.89%、4.87%.由此可知下调循环冲击能量有利于降低RCRCS动态强度属性对于含水饱和度的敏感性.

2) 动态能量耗散分析

(1)单一循环冲击模式RCRCS能量耗散演化趋势.循环冲击试验时单次冲击能量耗散整体呈现逐次下降趋势(相同冲击幅值)，同时统计循环周期内的能量耗散下降曲线中间存在突降现象，分别以循环强冲击和循环弱冲击模式为例，如图10b1、10b2，对应突降现象出现的冲击顺序分别为第2次、第3次，其中强冲击第2、3次的RCRCS平均能量耗散降幅分别为3.81%、1.24%；弱冲击

第2,3,4,5,6,7次的RCRCS平均能量耗散降幅分别为 1.72%, 1.61%, 3.52%, 1.25%, 1.01%, 1.13%,可知随着冲击次数的增长,RCRCS内部裂隙增长所需的耗散能逐次降低,同时前期裂纹初始发育需要的耗散能明显高于后续扩展延伸阶段.

(2)梯度含水饱和度RCRCS能量耗散对比特征. 含水饱和度梯度与RCRCS的初始裂纹发育耗散能(单次冲击耗散能突降前)、完全破坏耗散能顺序基本一致,但是0% 含水饱和度各阶段需要的耗散能均与33%～100% 存在明显差距,以循环低强度冲击为例,如图 10b2 所示. 0%,33%,66%,100% 含水饱和度RCRCS的初始裂纹发育耗散能分别为 14.73,13.56,13.26,12.86 J,完全破坏耗散能分别为 47.19,45.48,44.36,43.61 J,对应过渡区间降幅分别为 0%～33% 区间 7.93%、3.63%,33%～66% 区间 2.31%、2.15%,66%～100% 区间 3.02%、1.73%. 不同含水饱和度条件下,RCRCS 冲击破坏过程的总耗散能大小排序主要由前期裂纹起裂与初始扩展阶段的耗散能决定.

(3)循环冲击模式 RCRCS 能量耗散对比特征. 研究发现 3 种循环冲击模式的能量耗散均同含水饱和度负相关并且 33% 为能量耗散斜率的拐点,但是不同冲击模式下能量耗散效率与总量存在明显差异,其中循环强冲击破坏模式表现为高效耗能的贯穿主裂纹,单次效率最高但是总容量最低,循环弱冲击破坏模式表现为低效耗能的累积微裂纹,单次效率最低但总容量最高,循环强弱冲击破坏模式介于二者之间,此外 3 种冲击模式下梯度含水饱和度能量耗散平均降幅由大至小顺序为循环强冲击、循环强弱冲击、循环弱冲击,对应能量耗散平均降幅分别为 22.61%、14.05%、7.59%. 可知适当降低循环冲击能量可削弱含水饱和度对能量耗散特征的影响,从而降低总耗散能对含水条件的敏感性.

3) 动态弹性模量分析

(1)单一循环冲击模式下动态弹性模量演化规律. 循环冲击过程中,动态弹性模量呈现“稳定衰减-临界突变”的阶段性演化特征(相同冲击幅值条件下),如图 10c,初始阶段,弹性模量呈缓慢平稳下降趋势,这是由于循环动载使试样内部原生微裂隙持续张开、滑移,但未形成贯通性损伤,RCRCS 骨架结构仍保持基本完整;随着冲击次数累积,微裂隙不断发育并相互连通,当损伤达到临界状态时,弹性模量出现突发性大幅下降,降幅可达初始值的 35%～55%,标志着试样内部结构发生不可逆破坏,抗变形能力显著丧失. 部分低含水饱和度试样在末次冲击后弹性模量无明显突变,但轻微扰动即发生整体破碎,表明其内部损伤已累积至临界水平,仅依赖轴压约束维持表面稳定状态.

(2)梯度含水饱和度对动态弹性模量的影响特征. 动态弹性模量与含水饱和度呈显著负相关,且不同含水饱和度区间的衰减敏感性存在明显差异. 以循环弱冲击模式为例,如图 10c2 所示,0%,33%,66%,100% 含水饱和度RCRCS的初始动态弹性模量分别为 6.82,5.76,5.31,4.89 GPa,末次冲击后分别降至 6.53,4.98,4.27,3.64 GPa;排除末次冲击的平均衰减速率分别为 0.04,0.13,0.18,0.25 GPa/次. 其中 0% 含水饱和度试样的弹性模量初始值最高且衰减最慢,体现了干燥状态下 RCRCS 更强的结构稳定性;33%～100% 含水饱和度区间,弹性模量初始值显著降低,且衰减速率随含水饱和度升高而加快,这是因为水分的软化作用削弱了煤体颗粒间的黏结力,同时促进微裂隙发育,导致材料抗变形能力持续弱化,且高含水饱和度下水分的润滑效应进一步加速了裂纹扩展.

(3)不同循环冲击模式下动态弹性模量的响应差异. 不同冲击模式下,动态弹性模量对含水饱和度的敏感性存在显著差异. 循环强冲击模式中,0% 与 33%～100% 含水饱和度试样的弹性模量初始差值达 1.06～1.93 GPa,且全程保持较大差距,表明强冲击能量集中释放时,干燥试样的结构优势更为突出,而浸水试样因强度弱化更易发生损伤累积;循环弱冲击模式下,各含水饱和度梯度的弹性模量初始差值较小(0.45～1.93 GPa),且衰减过程更为平缓,说明弱冲击通过逐步累积损伤,降低了干燥与浸水状态下材料的结构差异;循环强弱组合冲击模式的弹性模量演化规律介于二者之间,初始差值与衰减速率均处于中等水平. 统计结果显示,循环强冲击、循环强弱冲击、循环弱冲击模式下,梯度含水饱和度试样的弹性模量平均降幅分别为 28.96%,19.43%,11.29%,表明下调循环冲击能量可有效降低动态弹性模量对含水饱和度的敏感性,其核心原因在于弱冲击下损伤以微裂纹累积为主,水分对裂纹扩展的加速效应相对有限,而强冲击下水分的软化与润滑作用显著放大了冲击损伤效果.

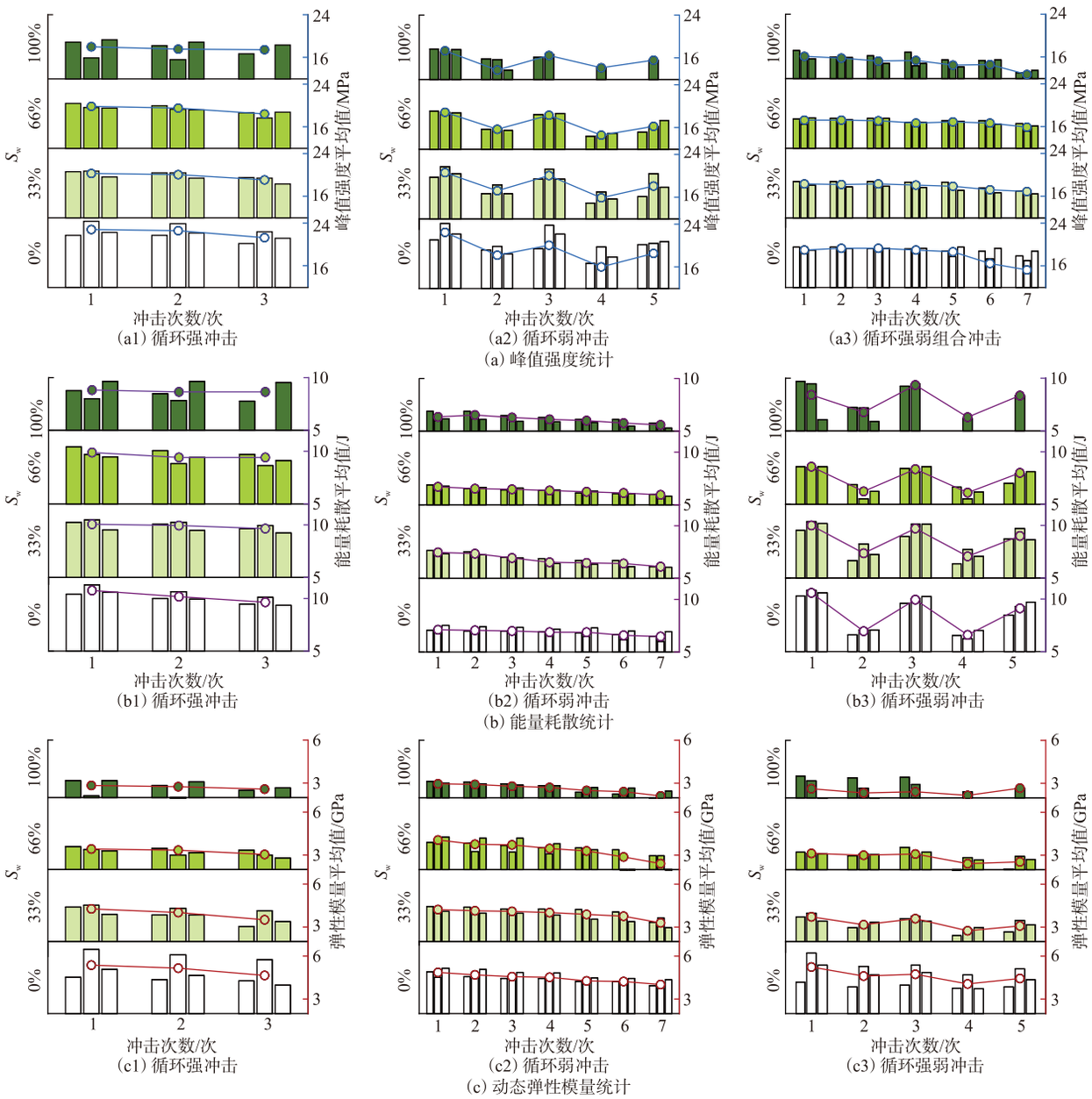


图 10 循环冲击下 RCRCS 峰值强度、能量耗散、弹性模量统计

Fig. 10 Statistics of peak strength, energy dissipation and dynamic elastic modulus of RCRCS under cyclic impact

4.3 加载频率与时间尺度效应讨论

现场远场矿震在时间尺度上呈现的是“事件间隔长、单次持续短”的触发过程，而 SHPB 冲击属于毫秒级的高应变率加载，能够表征煤岩在应力波作用下的动态响应、裂纹瞬态扩展与能量耗散特征. 二者的差异主要体现在：SHPB 中循环冲击的间隔通常为 s/min 级，现场则可能为 h/d 级甚至更长. 因此本文将 SHPB 循环冲击理解为对“多次应力波事件”的材料尺度复现：单次冲击的应力幅值与应变率对应扰动强度，循环次数与耗散能累积对应损伤累积水平.

现场长间隔加载会引入显著的时间相关过程，例如：高静载下的蠕变裂纹亚临界扩展、孔隙水压力的耗散与再分布、渗流扩散导致的含水状态演化等等，这些过程会使“同等事件数”对应的实际破坏历时出现差异性. 本文试验采用梯度含水饱和度并在冲击过程中保持含水状态不变，旨在突出“浸水弱化背景下，循环动载导致的疲劳损伤与阈值退化”路线. 因此，本文试验结论的现场应用角度为：在给定含水弱化水平下，煤岩柱对“多次扰动事件”的敏感性与阈值退化趋势.

现场实际应用时，可将本文结果用于建立“扰动强度（能量/峰值速度/动态应力）-微震事件数量-承载阈值退化”的量化关系：可用微震统计得到

的事件能量与发生频次，将试验获得的“达到显著强度突降或宏观裂纹贯通所需的等效事件数/累积耗散能”映射为现场的风险演化指标，该估算受到现场应力重分布、渗流扩散与蠕变等因素影响，需要结合长期监测进一步校核.

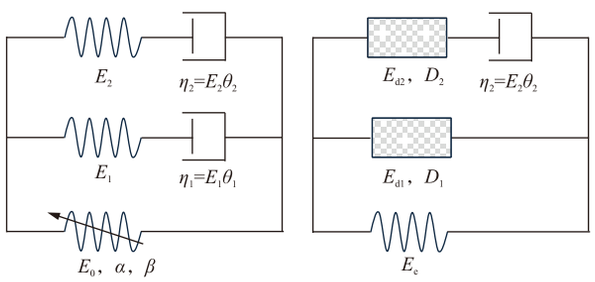
5　高应力频扰动浸水煤柱频繁冲击机理

5.1　频扰动-恒浸水 RCRCS 本构模型

Z-W-T 模型主要由 1 个非线性弹簧与 2 个 Maxwell 体并联而成，如图 11a，研究表明其能够有效表征脆性材料的强度和变形特征，其表达式为：

$$\sigma = E_e\varepsilon + \lambda_1\varepsilon^2 + \lambda_2\varepsilon^2 + E_1\int_0^t \dot{\varepsilon}\exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right)\mathrm{d}\tau + E_2\int_0^t \dot{\varepsilon}\exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right)\mathrm{d}\tau, \tag{3}$$

式中：E_e，λ_1 和 λ_2 为与岩石特性相关弹性的常数；E_1，E_2，θ_1 和 θ_2 分别指低频、高频 Maxwell 体的弹性常数与松弛时间，其中 θ_1 对应松弛时间范围为 $10^1\sim10^2$ s，而 θ_2 对应范围为 $10^{-6}\sim10^{-4}$ s.



(a) Z-W-T模型　　(b) 改进Z-W-T模型

图 11　循环冲击梯度含水 RCRCS 损伤本构模型

Fig. 11　damage constitutive model of cyclic impact gradient water-bearing RCRCS

循环冲击试验冲击时间极短，在这种条件下低频的 Maxwell 体没有足够的时间进行松弛，故将该部分简化为一根弹性系数为 E_1 的弹簧. RCRCS 在不同含水饱和度条件下的微裂隙等缺陷发育特征不同，这是 RCRCS 失稳破坏的内因，循环冲击作用下，RCRCS 内部裂隙进一步扩展，最终导致岩体表面出现宏观裂隙，这是 RCRCS 失稳破坏的外因. 而 Z-W-T 模型并不能综合考虑浸水和循环冲击带来的损伤影响，因此，需要在 Z-W-T 模型中引入损伤因子，考虑到黏性体并没有损伤特性，而弹性体却可以受到损伤，因此将高频 Maxwell 体中弹性体和非线性弹簧替换为损伤体. 综上，在 Z-W-T 模型的基础上，构建了考虑浸水和循环冲击的损伤演化模型，如图 11b，新的模型由 1 个黏性元件、1 个弹性元件和 2 个损伤体组成.

损伤体具有各项同性的特性，且其强度服从 Weibull 分布，其概率密度函数为：

$$P(\varepsilon) = \frac{m}{f_0}\left(\frac{\varepsilon}{f_0}\right)^{m-1}\cdot\exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{f_0}\right)^m\right], \tag{4}$$

式中：m 和 f_0 为分布函数的相关参数.

由于损伤体的强度服从 Weibull 分布，则其损伤变量 D 为：

$$D = 1 - \frac{\int_\varepsilon^{\varepsilon+\mathrm{d}\varepsilon} P(\varepsilon)\mathrm{d}x}{\int_0^\infty P(\varepsilon)\mathrm{d}x} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{f_0}\right)^m\right], \tag{5}$$

由上述可知，损伤体 D_1 的本构方程为

$$\sigma_1 = E_{d1}(1-D_1)\varepsilon = E_{d1}\exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{f_1}\right)^{m_1}\right]\varepsilon, \tag{6}$$

考虑到损伤体 D_2 与黏性元件串联，得：

$$\begin{cases}\sigma_2 = \sigma_\eta,\\ \varepsilon = \varepsilon_2 + \varepsilon_\eta.\end{cases} \tag{7}$$

其中，

$$\begin{cases}\varepsilon_2 = \dfrac{\sigma_2}{E_{d2}(1-D_2)},\\ \dot{\varepsilon}_\eta = \dfrac{\sigma_\eta}{\eta}.\end{cases} \tag{8}$$

对式(7)求导而后进行拉普拉斯变换，得：

$$\mathcal{L}\left[\dot{\varepsilon}(t)\right] = \int_0^{+\infty}\left[\frac{\dot{\sigma}_2(t)}{E_{d2}(1-D_2)} + \frac{\sigma_\eta(t)}{\eta}\right]\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t = \frac{\mathcal{L}\left[\sigma_2(t)\right]\left[s + \dfrac{E_{d2}(1-D_2)}{\eta}\right]}{E_{d2}(1-D_2)}, \tag{9}$$

结合边界条件 $\sigma_2(0)=0$，$\varepsilon(0)=0$，得：

$$\sigma_2 = \eta\dot{\varepsilon}\left\{1 - \exp\left[-\frac{E_{d2}(1-D_2)\varepsilon}{\eta\dot{\varepsilon}}\right]\right\}. \tag{10}$$

弹性体 e 的本构方程为：

$$\sigma_e = E_e\varepsilon, \tag{11}$$

考虑到 3 元件并联，联立式(6)，式(9)和式(10)得组合体的本构方程为：

$$\sigma = E_{d1}\exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{f_1}\right)^{m_1}\right]\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}\left\{1 - \exp\left[-\frac{E_{d2}(1-D_2)\varepsilon}{\eta\dot{\varepsilon}}\right]\right\} + E_e\varepsilon. \tag{12}$$

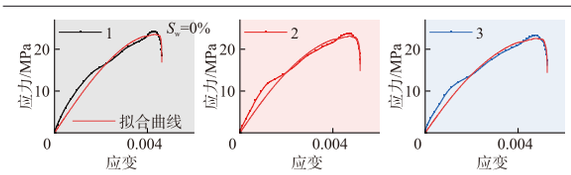
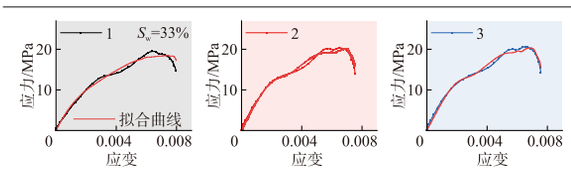
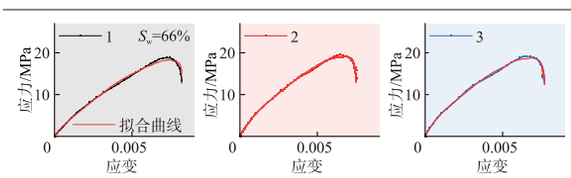
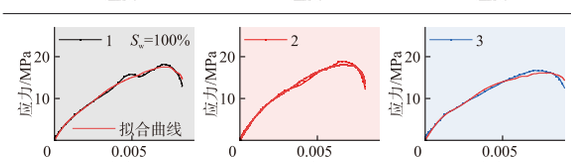
令 $\theta = \dfrac{\eta}{E_{d2}}$，则式(11)转换为：

$$\sigma = E_{d2}\theta\dot{\varepsilon}\left\{1-\exp\left[-\frac{E_{d2}(1-D_2)\varepsilon}{\eta\dot{\varepsilon}}\right]\right\}+ E_{d1}\exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{f_1}\right)^{m_1}\right]\varepsilon + E_e\varepsilon \quad (13)$$

式(13)展示的本构模型中有8个参数需要确定. 其中f的大小一般小于0.5,而m一般小于10. 通过MATLAB软件中lsqnonlin函数进行拟合,结果如表3所示,可以看出,考虑浸水、循环冲击累计损伤演化的煤岩组合体动态本构模型能够较好的拟合试验曲线,其拟合曲线的R^2均大于0.9且峰值应力误差值小于5%,表明该模型有效地表征了RCRCS在循环冲击和梯度浸水条件下的动态强度和演化特性.

表3 循环冲击梯度含水饱和度RCRCS动态模型拟合参数与拟合曲线

Table 3 Fitting parameters and curves of dynamic model of cyclic impact gradient water saturation RCRCS

RCRCS循环冲击和理论拟合应力-应变曲线	冲击次数	E_e/GPa	E_{d1}/GPa	m_1	f_1	E_{d2}/GPa	m_2	f_2	θ/ms	R^2
	1	2.600	2.700	2.157	0.005	3.000	1.996	0.007	0.798	0.99
	2	2.579	2.700	1.932	0.005	3.000	1.479	0.016	0.525	0.99
	3	2.510	2.700	1.778	0.005	3.000	1.383	0.016	0.502	0.99
	1	1.900	2.500	1.659	0.002	3.000	0.515	0.400	0.067	0.98
	2	1.850	2.500	3.807	0.003	3.000	8.193	0.353	0.118	0.99
	3	1.750	2.500	3.706	0.003	3.000	7.848	0.339	0.135	0.99
	1	1.800	2.300	0.825	0.001	3.000	0.167	0.400	0.073	0.99
	2	1.712	2.300	1.362	0.001	3.000	0.330	0.400	0.145	0.99
	3	1.600	2.300	1.450	0.001	3.000	0.429	0.400	0.130	0.99
	1	1.500	2.000	1.828	0.001	3.000	7.555	0.331	0.075	0.99
	2	1.400	2.000	2.283	0.002	3.000	0.883	0.400	0.115	0.99
	3	1.2000	2.000	2.472	0.002	3.000	9.817	0.395	0.073	0.98

5.2 浸水煤柱频繁冲击机理

基于改进Z-W-T损伤本构模型及其拟合结果,恒浸水-频扰动作用下的高应力煤柱频繁冲击可归结为"浸水弱化导致承载阈值降低→累积损伤促使承载阈值持续下移→承载阈值临界突变触发失稳冲击"的演化过程.

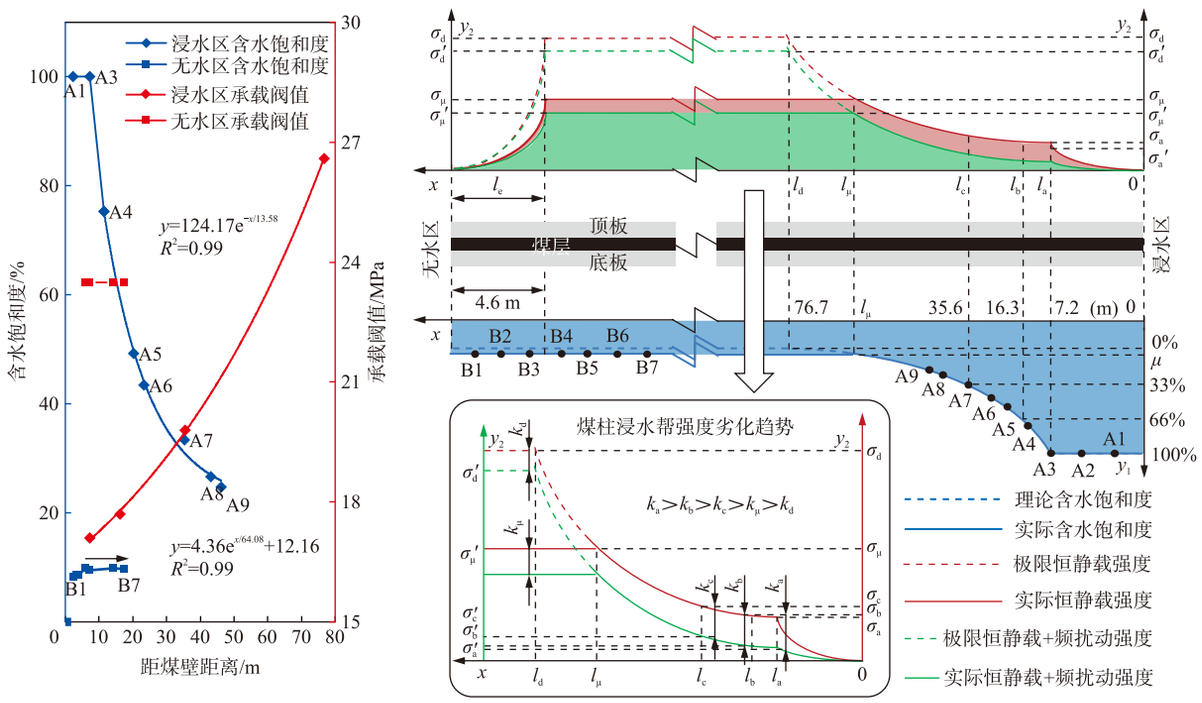
1)浸水导致初始承载阈值降低. 浸水能够显著降低结构的初始承载能力,表现为弹性分量等效模量E_e整体下移. 以首次冲击为例,含水饱和度由0%增至100%时,E_e由2.600 GPa降至1.500 GPa,初始刚度水平下降约42%. 这意味着在相同高静载背景下,浸水煤柱及其组合结构更易进入非线性损伤阶段,为后续扰动触发提供了更小的安全裕度.

2)循环冲击加速承载阈值退化. 循环冲击导致强度参数逐次退化,体现为损伤累积驱动的本构退化过程. 含水饱和度从0%到100%使E_e初值下降约42%,同时使循环退化幅度由3.5%提高到20%,即"初值更低、退化更快"的叠加效应将强度阈值持续推向低位. 该结果表明浸水不仅降低初始承载水平,还显著放大循环冲击下的退化幅度与敏感性.

3)损伤累积引发承载阈值临界突变. 试验统计的峰值强度与动态弹性模量随循环次数呈阶段性衰减,并在后期出现加速退化/突降特征. 该现象可在本构框架内理解为:随着冲击次数增加,等效刚度参数持续下降,损伤变量进入加速演化阶段,当损伤累积至一定水平后,结构有效承载分量发生快速衰减,峰后软化显著加剧,从而在宏观上表现为峰值强度与模量的同步突变式下降.

基于理论分析结果与现场实测浸水煤柱含水率分布情况,如图12,现场实测煤层含水率仅用于

说明含水空间梯度与弱化分区，外推试验结论时应将其与试样含水分级作等效对应，可知深井高应力浸水煤柱频繁冲击地压发生机理为：深井水仓煤柱长期处于高静载环境中，浸水区域初始承载阈值降低，并在远场矿震与采动扰动等多次动态事件作用下持续累积损伤，导致承载阈值随事件序列不断下移．由于浅部浸水区域退化速率显著高于内部干燥区，其更易率先进入损伤加速与临界突变阶段，形成局部失稳并诱发应力重分布；应力向核部集中后，后续扰动事件将更容易跨越已降低的承载阈值，从而表现为冲击地压的频繁发生．由此，频繁冲击并非单次强扰动的偶发结果，而是一个渐进演化过程的结果，即浸水弱化降低初始阈值-循环扰动累积损伤，推动阈值持续下移-阈值临界突变，最终引发失稳冲击．



(a) 水仓煤柱围岩饱和含水度实测结果　　(b) 浸水煤柱宏观强度演化规律

图 12　高频扰动煤岩柱浸水劣化冲击机理

Fig. 12　Impact mechanism of water immersion deterioration of high static load-frequency disturbance coal pillar

6　结　论

1）研究了梯度含水饱和度岩-煤-岩组合试样（RCRCS）循环冲击加载的宏观损伤特征．RCRCS煤层碎块分形维数与应变集中范围随含水饱和度升高而持续增大，0%～33% 区间增长最为显著．相较于循环强（2.8 m·s^{-1}）、强弱组合（2.8/2.3 m·s^{-1}）冲击，循环弱（2.3 m·s^{-1}）冲击可缩小干燥与含水状态的强度差距．RCRCS局部应变程度随着循环强冲击次数增加整体快速均匀增长，循环弱冲击模式中前期损伤缓慢累积、后期宏观裂纹突增，组合冲击的应变特征介于二者之间．

2）研究了梯度含水饱和度RCRCS循环冲击加载的力学响应规律．0% 含水饱和度试样抵抗循环动态疲劳损伤的能力显著优于33%～100% 区间，浸水对动态强度的弱化作用普遍存在，但不同冲击模式下敏感性差异明显，循环强冲击的浸水软化效应最为突出．下调冲击能量可降低RCRCS强度参量对于含水饱和度的敏感性，循环冲击中前期裂纹初始发育耗散能高于后续扩展阶段，其总量顺序主要由裂纹初始发育的耗散能决定．

3）揭示了高应力频扰动大巷浸水煤柱频繁冲击机理：深井水仓煤柱长期处于高静载环境中，浸水区域初始承载阈值降低，并在远场矿震与采动扰动等多次动态事件作用下持续累积损伤，导致承载阈值随事件序列不断下移．由于浅部浸水区域退化速率显著高于内部干燥区，其更易率先进入损伤加速与临界突变阶段，形成局部失稳并诱发应力重分布；应力向核部集中后，后续扰动事件将更容易跨越已降低的承载阈值，从而表现为冲击地压的频繁发生．

参考文献：

[1] 潘一山，宋义敏，刘 军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(9)：2081-2095.
PAN Yishan，SONG Yimin，LIU Jun. Pattern，change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(9)：2081-2095.

[2] 窦林名，孙振于，曹安业，等. 煤矿冲击地压动静载危险源头分类、辨识与监测方法[J]. 煤炭科学技术，2025，53(9)：53-62.
DOU Linming，SUN Zhenyu，CAO Anye，et al. Classification，identification and monitoring method of dynamic-static load hazard sources of coal mine rockburst[J]. Coal Science and Technology，2025，53(9)：53-62.

[3] 曹安业，梁颖欣，杨 旭，等. 人工智能赋能下的冲击地压监测预警方法研究进展[J/OL]. 中国矿业大学学报，1-22[2026-03-17]. https://link.cnki.net/urlid/32.1152.td.20260313.1620.003
CAO Anye，LIANG Yingxin，YANG Xu，et al. Research progress on rock burst monitoring and early warning methods empowered by artificial intelligence[J/OL]. Journal of China University of Mining & Technology，1-22[2026-03-17]. https://link.cnki.net/urlid/32.1152.td.20260313.1620.003

[4] 卢志国，高富强，杨 磊，等. 深埋巷道动静载叠加诱冲物理模拟试验系统研制与应用[J]. 中国矿业大学学报，2025，54(5)：959-970.
LU Zhiguo，GAO Fuqiang，YANG Lei，et al. Development and application of a physical simulation experimental system for rock burst induced by superposed dynamic and static loads in deep buried roadways[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2025，54(5)：959-970.

[5] 王 凯，孙加智，杜 锋，等. 深部煤岩瓦斯复合动力灾害中围岩与煤层的能量互馈机制[J]. 中国矿业大学学报，2025，54(6)：1242-1260.
WANG Kai，SUN Jiazhi，DU Feng，et al. Energy mutual feedback mechanism between surrounding rock and coal seam in deep coal-rock-gas compound dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2025，54(6)：1242-1260.

[6] 袁 亮，马衍坤，黄勤豪，等. 煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(5)：827-856.
YUAN Liang，MA Yankun，HUANG Qinhao，et al. Current status and prospects of the development of catastrophe stratum simulation materials for model tests of coal-rock dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2024，53(5)：827-856.

[7] 崔 峰，罗 钟，来兴平，等. 冲击地压矿井科学产能确定及科学提升产能研究[J]. 煤炭科学技术，2025，53(2)：81-95.
CUI Feng，LUO Zhong，LAI Xingping，et al. Research on determination of scientific productivity and scientific productivity improvement in rockburst-prone coal mines[J]. Coal Science and Technology，2025，53(2)：81-95.

[8] 曹安业，陈 凡，刘耀琪，等. 冲击地压频发区矿震破裂机制与震源参量响应规律[J]. 煤炭学报，2022，47(2)：722-733.
CAO Anye，CHEN Fan，LIU Yaoqi，et al. Fracture mechanism of mine earthquake and response law of focal parameters in frequent rockburst areas[J]. Journal of China Coal Society，2022，47(2)：722-733.

[9] 谭云亮，范德源，刘学生，等. 煤矿超大断面硐室判别方法及其工程特征[J]. 采矿与安全工程学报，2020，37(1)：23-31.
TAN Yunliang，FAN Deyuan，LIU Xuesheng，et al. Discrimination method and engineering characteristics of super-large section chamber in coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2020，37(1)：23-31.

[10] 潘俊锋，闫耀东，马小辉，等. 考虑时变特性的煤层大巷群冲击地压机理及防治[J]. 煤炭学报，2022，47(9)：3384-3395.
PAN Junfeng，YAN Yaodong，MA Xiaohui，et al. Mechanism and prevention of rock burst in coal seam alleys considering time-varying characteristics[J]. Journal of China Coal Society，2022，47(9)：3384-3395.

[11] 钟涛平，李振雷，何学秋，等. 近直立煤岩层层裂压曲破坏诱冲机理[J/OL]. 中国矿业大学学报，1-16[2026-03-20]. https://link.cnki.net/urlid/32.1152.TD.20260317.1541.003
ZHONG Taoping，LI Zhenlei，HE Xueqiu，et al. Mechanism of rock burst induced by bedding splitting and compression-buckling failure in steeply inclined coal and rock strata[J/OL]. Journal of China University of Mining & Technology，1-16[2026-03-20]. https://link.cnki.net/urlid/32.1152.TD.20260317.1541.003.

[12] 钟涛平，李振雷，陈建强，等. 近直立特厚煤层应力调控防冲方法及机制[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(2)：291-306.

ZHONG Taoping, LI Zhenlei, CHEN Jianqiang, et al. Stress regulation-based rock burst prevention method and mechanism for steeply inclined extra-thick coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 291-306.

[13] 夏永学，潘俊锋，谢　非，等. 特厚煤层大巷复合构造区重复冲击致灾机制及控制技术[J]. 岩石力学与工程学报，2022，41(11)：2199-2209.
XIA Yongxue, PAN Junfeng, XIE Fei, et al. Mechanism and control technology of repeated impact disaster in compound structural area of roadway in extra-thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2199-2209.

[14] 朱斯陶，张　翔，姜福兴，等. 深井高应力大巷煤柱释能改性防冲机理及应用[J]. 煤炭学报，2024，49(9)：3711-3727.
ZHU Sitao, ZHANG Xiang, JIANG Fuxing, et al. Energy release modification mechanism and application of coal pillar for rockburst prevention in deep high-stress main roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3711-3727.

[15] 张　翔，朱斯陶，张修峰，等. 深厚表土运动诱发高应力煤柱频繁冲击机制及防控试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(10)：2552-2569.
ZHANG Xiang, ZHU Sitao, ZHANG Xiufeng, et al. Experimental study on mechanism and prevention of frequent rockburst in high-stress coal pillar induced by thick overburden movement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(10): 2552-2569.

[16] DU H B, DAI F, LI A, et al. Dynamic responses and failure behaviors of saturated rocks subjected to repetitive compression-shear impacting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56: 4697-4714.

[17] SHEN R X, ZHANG L Y, GU Z J, et al. Study on progressive damage mechanics and fracture mechanism of natural and water-saturated sandstones under dynamic load[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025, 188: 109043.

[18] WANG X Y, DONG B, GAO X C, et al. Dynamic behaviour and energy evolution of granite in a tunnel under cyclic impact loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56: 8997-9012.

[19] WANG X Y, LIU Z Y, GAO X C, et al. Dynamic characteristics and energy evolution of granite subjected to coupled static-cyclic impact loading[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9: 62.

[20] DAI B, SHAN Q W, CHEN Y, et al. Mechanical and energy dissipation characteristics of granite under cyclic impact loading[J]. Journal of Central South University, 2022, 29: 116-128.

[21] ZHANG L, WANG E Y, LIU Y B, et al. Experimental research into the dynamic damage characteristics and failure behavior of rock subjected to incremental repeated impact loads[J]. Engineering Geology, 2024, 331: 107435.

[22] ZHANG L, WANG E Y, LIU Y B, et al. Research on the energy dissipation characteristics and stress wave spectrum analysis of red sandstone subjected to progressive load cyclic impact[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57: 10849-10876.

[23] ZHOU T, HAN Z Y, LI D Y, et al. Experimental study of the mechanical and fracture behavior of flawed sandstone subjected to coupled static-repetitive impact loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 117: 103161.

[24] GONG F Q, XU L, WANG S R, et al. Rockburst proneness index of surrounding rock considering rock mass quality and excavation disturbance factor[J]. Underground Space, 2025, 24: 1-21.

（责任编辑　仝　腾）