DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0601

水力耦合作用下岩石动态强度疲劳劣化特性研究

金解放*，肖筱丰，钱 豪，袁 伟，彭孝旺，方立兴，熊慧颖，郝 爽
（江西理工大学 土木与测绘工程学院，江西 赣州 341000）

摘要：深部岩体处于高地应力和高水压力的复杂环境，在多次爆破扰动下，易诱发突水灾害。但关于水力耦合作用对岩石强度劣化特性的研究滞后于工程实际。利用自主研发的高水压高地应力岩石动力学测试系统，对水力耦合红砂岩开展循环冲击试验。基于试验数据，分析动态峰值应力、动态劣化系数、动态增强因子（dynamic intensify factor：*DIF*）和损伤变量随循环冲击的变化规律，并构建水力耦合岩石动态损伤累积模型和疲劳寿命模型，探究水力耦合作用对岩石强度劣化特性的影响规律及机制，揭示深部突水灾害机制，提升深部岩体工程安全防护水平。结果表明，循环冲击作用下，水力耦合岩石动态峰值应力和动态增强因子 *DIF* 加速下降，动态劣化系数和损伤变量加速上升，表现出明显的强度劣化现象；当冲击次数接近岩石疲劳寿命的 50%时，岩石动态劣化系数的增长速率显著提升，表现出“劣化加速现象”。水压力可减缓动态峰值应力、*DIF*、动态劣化系数和损伤变量随循环冲击的变化速率，削弱岩石“劣化加速现象”，使其疲劳寿命延长；轴向静应力则加快动态峰值应力、*DIF*、动态劣化系数和损伤变量随循环冲击的变化速率，增强岩石“劣化加速现象”，缩短其疲劳寿命。本文构建的水力耦合岩石疲劳寿命模型误差低于 16%，能准确预测深部岩体的疲劳寿命。

关键词：岩石力学；深部岩体；高水压；循环冲击；动态强度劣化；疲劳寿命模型
中图分类号：TU 45 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2026)04－0996－18

***通信作者**：金解放（1977－），现任教授，主要从事岩石动力学方面的研究工作。E-mail：jiefang_jin@jxust.edu.cn

Fatigue degradation characteristics of rock dynamic strength subjected to hydro-mechanical coupling condition

JIN Jiefang*, XIAO Youfeng, QIAN Hao, YUAN Wei, PENG Xiaowang, FANG Lixing, XIONG Huiying, HAO Shuang
(*School of Civil and Surveying Engineering*, *Jiangxi University of Science and Technology*, *Ganzhou*, *Jiangxi* 341000, *China*)

Abstract：Deep rock masses are situated in a complex environment characterized by high ground stress and elevated water pressure. Under repeated blasting disturbances, these rock masses are prone to inducing water inrush disasters. However, research on the effects of water pressure on the strength degradation characteristics of rock remains limited, resulting in a lag of relevant theoretical studies behind engineering practices. In this context, a self-developed dynamic test system has been employed to conduct cyclic impact tests on red sandstone under hydro-mechanical coupling conditions. Based on the test results, the evolution of dynamic peak stress, dynamic degradation coefficient, dynamic intensity factor (*DIF*), and damage variable with cyclic impacts has been analyzed. Additionally, dynamic damage accumulation and fatigue life models for rocks subjected to hydro-mechanical coupling conditions have been established to explore the mechanisms by which hydro-mechanical coupling affects strength degradation. This research aims to elucidate the mechanisms behind water inrush disasters in deep rock mass engineering and to enhance the safety resilience of such projects. Key findings are as follows: both the dynamic peak stress and *DIF* of

收稿日期：2025－08－20；**修回日期**：2025－10－31
基金项目：江西省自然科学基金资助项目（20232ACB204015）；国家自然科学基金资助项目（52174112）
Supported by Jiangxi Provincial Natural Science Foundation (Grant No. 20232ACB204015) and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52174112)

rock under hydro-mechanical coupling conditions exhibit accelerated decreasing trends, while the dynamic degradation coefficient and damage variable increase rapidly, demonstrating distinct strength degradation characteristics. When the number of cyclic impacts approaches 50% of its fatigue life, the growth rate of the dynamic degradation coefficient spikes, resulting in an “accelerated deterioration phenomenon”. Water pressure mitigates the rate of change of dynamic peak stress, *DIF*, dynamic degradation coefficient, and damage variable in rock, thereby attenuating the “accelerated deterioration phenomenon” and prolonging fatigue life. Conversely, axial static stress increases the rate of change of these parameters, intensifying the accelerated deterioration phenomenon and shortening the fatigue life of the rock. The developed fatigue life model for rocks demonstrates an error rate below 16%, accurately predicting the fatigue life of deep rock masses.

Key words: rock mechanics; deep rock mass; high water pressure; cyclic impact; dynamic strength degradation; fatigue life model

***Corresponding author:** JIN Jiefang (1977–), professor, is engaged in scientific research on rock dynamics. E-mail: jiefang_jin@jxust.edu.cn

1 引 言

随着国家深地资源开发与立体交通网规划的深入推进，岩体工程正加速向深部发展[1]。深部岩体处于高水压力和高地应力的复杂地质环境，在多次爆破开挖扰动下，易诱发突水等重大工程灾害[2]。在高地应力的长期作用下，深部岩体微裂纹持续扩展，导致隔水层丧失承载能力和阻隔水性能，且由于其内部裂隙的贯通度增加，逐渐形成水流通道，这是突水灾害的静态形成机制[3]。在多次爆破开挖过程中，单次爆破动载荷虽不足以直接破坏震源中远区的岩体，却能促使岩体内部原生微裂纹向周围含水裂隙带扩展[3]，导致其强度劣化，进而加速水流通道的形成，这是突水灾害的动态形成机制。综上，深部岩体工程在多次爆破动载荷下的突水灾害，本质上是地应力、水压力和多次开挖扰动耦合作用下其强度劣化及损伤累积的结果。

强度劣化是岩石在多次爆破开挖等动载荷作用下呈现出的力学特征，是表征其动态疲劳力学性能的关键参数之一。X. Y. Wang 等[4-7]聚焦地应力和含水率等因素，对岩石强度劣化特性开展研究。围压通过抑制微裂纹扩展，减缓动态峰值应力随循环冲击的劣化速率[5]。轴向静应力通过促进原生微裂纹的起裂和扩展，加快动态峰值应力随循环冲击的劣化速率[6]。随着含水率的增加，岩石动态峰值应力和动态抗压强度随循环冲击的劣化速率上升[7]。水压力对岩石在静态压缩条件下的局部拉伸破坏和变形均具有显著影响[8]，这必然也会影响岩石在多次爆破载荷作用下的强度劣化特性。相比于地应力或含水率对岩石动态力学特性影响研究，关于水力耦合岩石动态力学特性研究较少，这制约了突水等深部岩体工程灾害的防治工作。

深部岩体常处于水压力和地应力耦合作用环境，探究水力耦合作用对岩石动态力学特性的影响，已成为深部岩石力学领域的重要研究方向之一。在试验设备研制方面，通过增设高水压加载装置对动静组合加载测试系统进行改进，实现高水压和高应力的耦合加载，为水力耦合岩石动态强度疲劳劣化特性的研究提供测试手段[9]。水压力对岩石动态强度的影响具有强化作用和弱化作用：一方面，水压力抵消部分轴向静应力，降低岩石骨架的有效应力，增加其动态强度；同时，水压力会抑制裂隙扩展[10]、阻碍裂隙滑动与错动[11]，进而提高岩石动态强度。另一方面，随水压力升高，水压力的弱化作用逐渐增强，削弱其强化作用的效果，导致岩石强度下降[12]。现有关于水力耦合作用下岩石动态力学特性的研究仍处于初步探索阶段，且没有探究水力耦合作用下岩石动态强度疲劳劣化特性，这不利于岩石动态疲劳力学特性的理论研究，更阻碍了突水灾害的防治和预警。

在研究岩石强度劣化规律时，常用动态劣化系数和动态增强因子分析其动态强度的劣化规律及机制[13-14]。动态劣化系数是表征循环冲击过程中岩石动态峰值应力劣化速率的关键参数；通过引入动态劣化系数分析岩石动态峰值应力的劣化规律，发现动态劣化系数在循环冲击后期快速上升，即破碎前的几次冲击中动态峰值应力的下降速率加快[13]。岩石动态强度随应变率的提升表现出增强现象，常用动态增强因子进行表征[14-15]。在循环动载荷作用下，岩石强度劣化会导致动态增强因子呈现下降趋势，但该趋势会随围压的增大而减缓[15]。岩石动态增强

因子和微裂纹密度存在一定的联系，随着微裂纹密度的增加，岩石动态增强因子逐步下降[14]。基于动态劣化系数和动态强度因子等参数，可探究水力耦合岩石动态峰值应力的劣化速率及动态强度增强现象随循环冲击的变化规律，有助于揭示水力耦合作用对岩体强度劣化特性的影响。

在多次爆破载荷作用下，岩石动态损伤累积是导致其强度劣化的根本原因[16-17]。损伤变量是岩石损伤累积程度的表征参数，受地应力、含水率、水压力等多方面因素影响[17-18]。轴向静应力会降低岩石波阻抗，致使耗散能增加，从而使损伤变量逐渐增长[13]；而围压则会抑制岩石裂纹扩展，降低损伤变量随轴向静应力的增长速率[16]。当含水率增加时，岩石颗粒间胶结物逐步软化或脱落，从而降低其黏聚力和骨架的承载力，使岩石损伤累积速率加快[17]。水压力对岩石损伤变量的影响也存在强化作用和弱化作用：水压力的强化作用对微裂纹扩展起抑制作用，削弱动载荷对岩石造成的动态损伤；水压力的弱化作用促使岩石裂隙贯通，使损伤变量增加[10-11]。由波阻抗构建的损伤变量确定方法准确性高，可精准量化岩石的动态损伤，为岩石损伤累积程度的定量分析提供测试手段[18]。岩石的宏观破坏是其损伤累积的最终结果，而疲劳寿命是岩石在特定赋存环境和冲击速度下发生宏观破坏所承受的最大冲击次数。聚焦冲击速度和温度对岩石疲劳寿命的影响，构建考虑温度和冲击速度的岩石疲劳寿命经验模型[19]，为水力耦合岩石疲劳寿命模型的构建提供新思路。研究水力耦合岩石损伤变量随循环冲击的变化规律，构建水力耦合岩石疲劳寿命模型，可反演水力耦合岩石的强度劣化机制，为深部岩体突水灾害防治及爆破参数优化提供疲劳寿命等参数支持。

为系统研究水力耦合作用下岩石动态强度疲劳劣化特性研究，利用自主研发的高水压高地应力岩石动力学测试系统，对水力耦合红砂岩开展循环冲击试验。分析动态峰值应力、动态劣化系数和动态增强因子(*DIF*)随循环冲击的变化规律，探究水力耦合作用对岩石强度劣化特性的影响。基于损伤变量和疲劳寿命等参数，构建水力耦合岩石动态损伤累积模型和疲劳寿命模型，揭示水力耦合作用对岩石强度劣化特性的影响机制。研究成果不仅完善了水力耦合岩石动态疲劳力学理论体系，更通过建立水力耦合岩石疲劳寿命和损伤累积模型，为深部岩体突水风险区域预测提供理论支撑。

2　水力耦合岩石循环冲击试验

2.1　试件制备

岩石试件选择均质性和完整性好的红砂岩，制备成圆柱体试件。根据国际岩石力学学会(ISRM)建议方法，试件尺寸为 ϕ 50 mm×50 mm，两端面平整度误差±0.02 mm，端面与轴线不垂直度小于 0.001 rad[20]。为降低岩石离散性对试验结果的影响，采用声波测速仪测量岩石试件的波速，剔除波速异常的试件。按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)，对红砂岩试件进行饱和处理[21]：先将挑选的岩石试件放入水中浸泡 48 h，随后每隔 1 h 测其质量，当相邻 2 次质量差不超过 0.01 g 时，视为试件已充分饱水。循环冲击试验的流程见图 1。

2.2　岩石动力学测试试验系统

分离式霍普金森压杆试验装置是岩石动力学领域的核心测试技术，能够模拟爆破动载荷对岩石造成的动态扰动，是研究岩石动态疲劳力学响应特性的关键手段。针对深部岩体处于高地应力和高水压的赋存环境，将传统分离式霍普金森压杆装置与自主研制的高水压加载系统结合，组成自主研制的高水压高地应力岩石动力学测试系统(以下简称“测试系统”)，开展循环冲击试验研究。测试系统的结构组成、性能参数和精度等详细参数及指标详见金解放等[9]的研究。测试系统可分为静应力加载装置、数据采集系统、高水压加载装置和动力发生装置等几个部分，如图 2 所示。与同类装置相比，该测试系统在现有动静组合加载系统的基础上增加高水压加载装置，可模拟深部高水压和高地应力环境，实现最大 35 MPa 的水压力加载，满足深部岩石强度劣化特性的测试需求。

高水压加载装置是测试系统的主要部分，由密封腔体和水压泵组成，可为岩石试件提供恒定的高水压力环境。静应力加载装置由入射杆、透射杆和油压泵组成；入射杆和透射杆上黏贴有应变片，且应变片至岩石试样端面的距离约 1 000 mm。动力发生装置由高压气室和纺锤形冲头组成，通过高压气体驱动纺锤形冲头，从而模拟岩体工程爆破开挖过程中产生的动载荷。数据采集系统由超动态应变仪、示波器、计算机和激光测速仪组成，可实时采集岩石应力波信号，以便后续对其动态力学特性进行分析。为保证应力波传播过程中的均匀性，入射杆和透射杆选用 40 Cr 合金钢进行加工，直径为 50 mm。

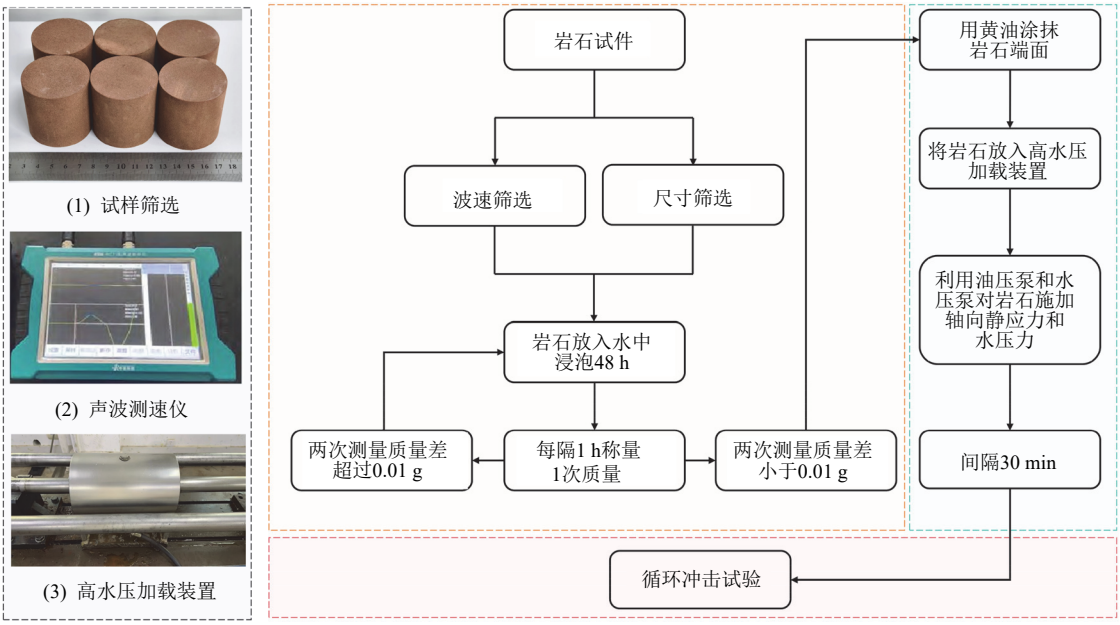
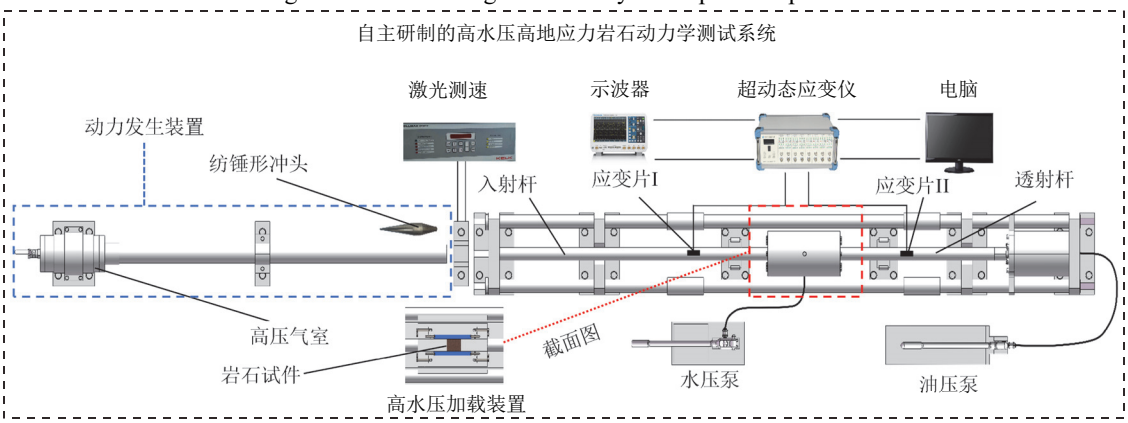


图 1　循环冲击试验流程示意图

Fig.1　Schematic diagram of the cyclic impact test process



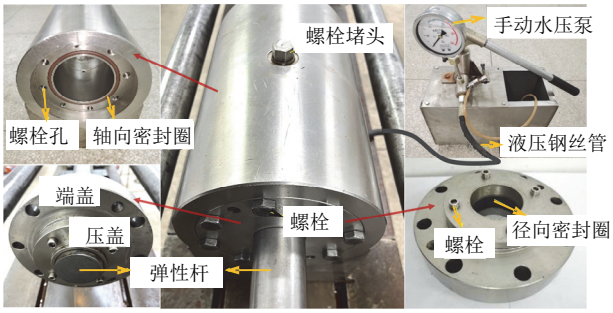
(a) 测试系统的示意图

(a) Schematic diagram of the test system



(b) 测试系统的实物图

(b) Physical diagram of the test system



(c) 高水压加载装置的实物图

(c) Physical diagram of the water pressure loading device

图 2　自主研制的高水压高地应力岩石动力学测试系统

Fig.2　Schematic diagram of the self-developed dynamic test system

杆件的关键参数包括：应力波传播速度 5 400 m/s，密度 7 810 kg/m^3，波阻抗 4 200 kg·cm^2·s，弹性模量 210 GPa。从图 3 可以看出，入射波和反射波的叠加曲线与透射波重合，这表明在冲击过程中岩石两端的应力状态达到平衡，证明了试验的可靠性。

2.3　试验方法

为模拟深部岩体工程中的高地应力和高水压环境，在循环冲击试验前需对饱和红砂岩试件依次施

加轴向静应力σ_a和水压力σ_w，如图 4 所示。其中，轴向静应力值分别设定为 27，36，45，54 MPa；水压力值分别设定为 3，6，12，18 MPa。通过静态压缩试验，当水压力为 3，6，12 和 18 MPa 时，岩石静态抗压强度σ_c分别为66.6，69.8，77.5 和 78.5 MPa。

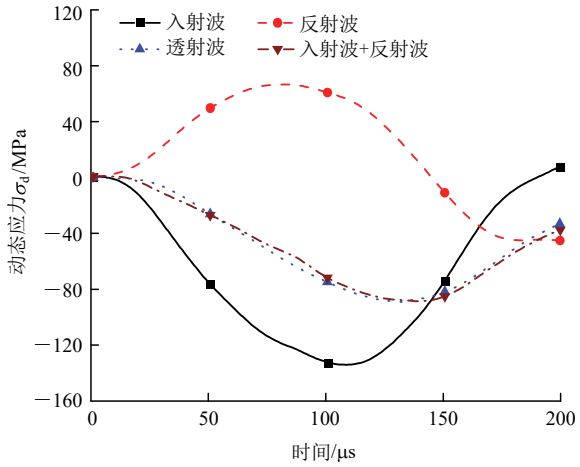


图 3　岩石动态应力平衡曲线

Fig.3　Dynamic stress balance curves of rock

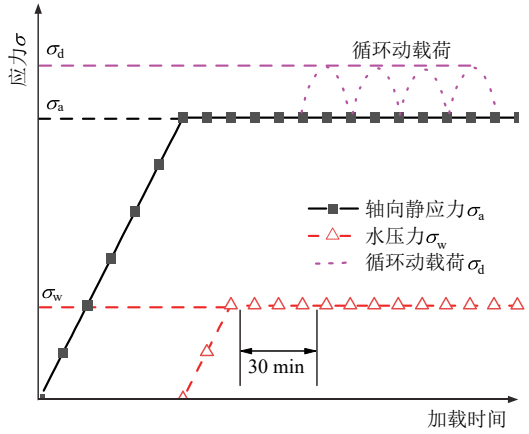


图 4　加载路径示意图

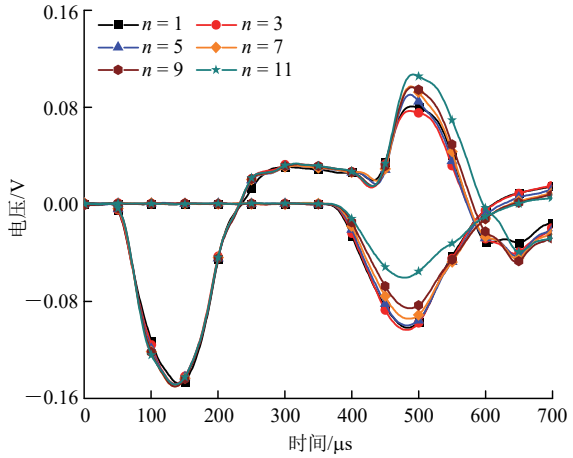
Fig.4　Schematic diagram of loading path

图 4 展示了轴向静应力σ_a、水压力σ_w和循环动载荷σ_d的加载路径。如图 1 所示，试验前，须用黄油均匀涂抹饱水红砂岩试件的端面，使试件与弹性杆的接触良好，减小摩擦。随后，利用油压泵和水压泵对岩石试件施加轴向静应力和水压力；在加载过程中始终保证轴向静应力大于水压力，使岩石试件与杆件间紧密接触。在轴向静应力和水压力加载完成后，将岩石试件放置 30 min，以便水能充分进入岩石裂隙，最后开展循环冲击试验。在试验过程中，冲击速度设置为 9.80 m/s(误差控制在 0.16 m/s 以内)，确保每次冲击的入射能相同。

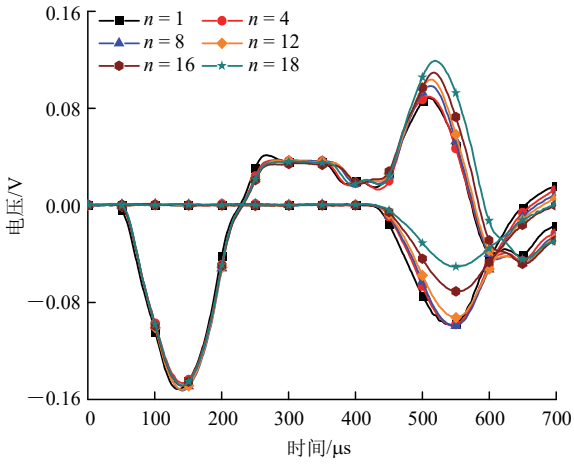
2.4　试验结果

通过循环冲击试验，可得水力耦合岩石的入射波、反射波和透射波数据。考虑到试验工况较多，选取部分工况的应力波波形进行展示，如图 5 所示。其中，n 为循环冲击次数。

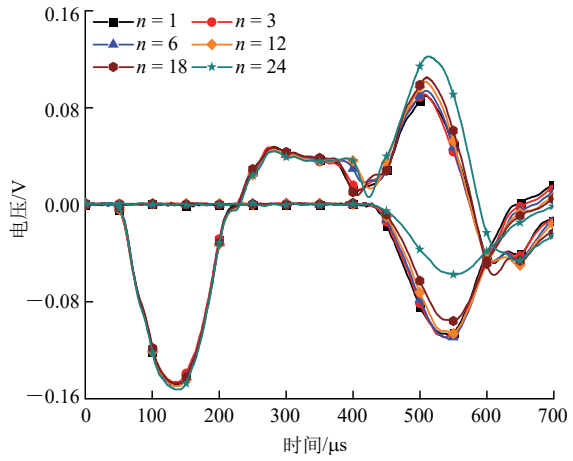
从图 5 可以看出，随循环冲击次数的增加，岩石反射波幅值呈递增趋势，透射波幅值呈递减趋势，且在破坏前几次的冲击中反射波和透射波幅值变化最为明显。在循环冲击过程中，岩石微裂纹的演化规律为“萌发 - 扩展 - 成核”。当循环冲击次数较少



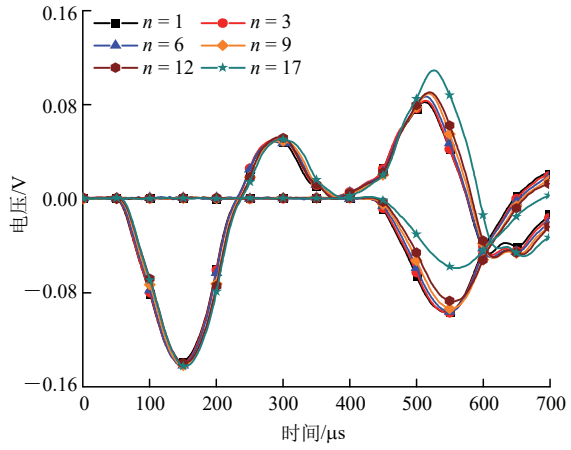
(a) σ_a = 36 MPa，σ_w = 3 MPa



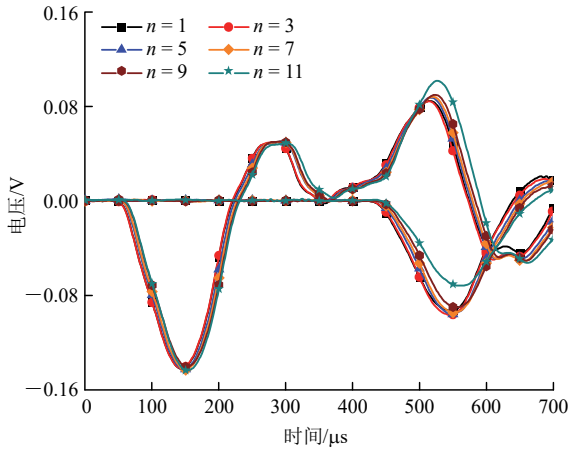
(b) σ_a = 36 MPa，σ_w = 6 MPa



(c) σ_a = 36 MPa，σ_w = 12 MPa



(d) σ_a = 45 MPa，σ_w = 12 MPa



(e) σ_a = 54 MPa，σ_w = 12 MPa

图 5　循环动载荷作用下岩石的应力波信号

Fig.5　Stress waves of rock under cyclic dynamic loads

时，岩石微裂纹发展稳定且扩展速度低，其波阻抗变化小，故反射波和透射波幅值变化不明显。随着循环冲击次数增多，岩石微裂纹逐步贯通、连接成片，使其骨架承载力大幅下降，波阻抗快速降低。此时，入射波在试件和弹性杆界面上的透射率降低，导致反射波幅值随循环冲击而上升、透射波幅值随循环冲击下降。从图 5 还可以看出，在轴向静应力相同时，随水压力的增大，反射波和透射波幅值的变化速率相对更低；而在水压力相同时，随轴向静应力的增大，反射波和透射波幅值的变化速率加快。基于一维应力波传播理论，岩石透射波和反射波幅值与动态应力和动态应变呈正相关，并分别表示岩石承载能力和能量耗散。分析认为，水压力和轴向静应力共同控制岩石的静态损伤程度，改变其波阻抗和透射率，进而影响反射波和透射波的幅值变化速率；而岩石反射波和透射波幅值的变化，必然使岩石动态应力－应变曲线发生改变。研究岩石典型动态应力－应变曲线，有助于深入探究水压力对岩石动态应力－应变曲线的影响。

基于循环冲击试验获取的岩石入射波、反射波和透射波数据，可得岩石典型的动态应力－应变曲线，如图 6 所示。

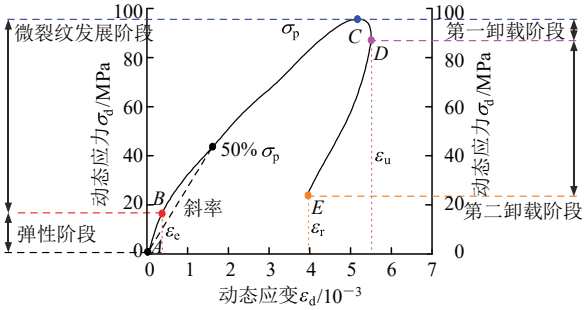


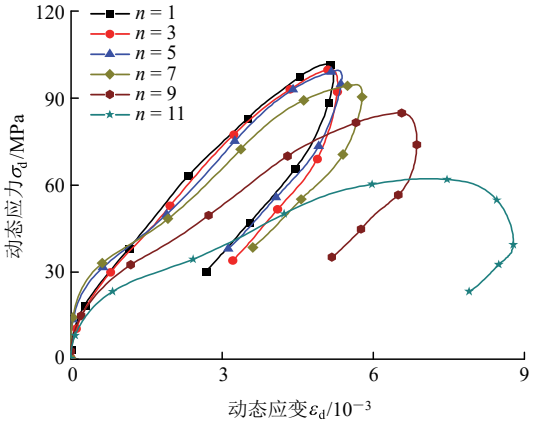
图 6　岩石典型动态应力－应变曲线

Fig.6　Typical dynamic stress-strain curves of rocks

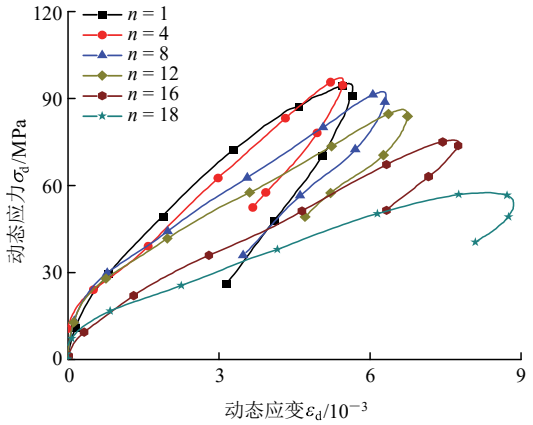
由于岩石试件经过饱和处理，岩石内部孔隙水在动态加载过程中不能及时排出，因此动态应力－应变曲线缺失孔隙压密阶段。如图 6 所示，岩石动态应力－应变曲线可划分为 *AB* 段、*BC* 段、*CD* 段和 *DE* 段。其中，*AB* 段是岩石弹性阶段，其对应的岩石动态应力－应变曲线的线性段。在动态加载条件下，水压力可以提高岩石弹性能力，使动变形模量增大[22]，这必然会影响其弹性阶段的斜率及长度。当动态应力超过弹性极限，岩石内部裂隙进入到微裂纹发展阶段(*BC* 段)；随着动态应力的增加，岩石动态应力－应变曲线斜率逐渐下降，意味着其微裂纹不断地扩展。水压力会提高岩石动态强度[14]，使其动态峰值应力上升，即 *C* 点对应的动态应力增长；此外，水压力还会延缓岩石微裂纹的扩展速率[14]，这必然会降低 *BC* 段斜率。当动态应力抵达 *C* 点后，岩石进入第一卸载阶段(*CD* 段)，其动态应力开始下降，动态应变仍继续增长，表明动载荷对岩石已造成不可逆的动态损伤。水压力的升高还会降低岩石骨架上的有效应力，削弱塑性变形[23]，从而使 *CD* 段缩短。当动态应力降低至 *D* 点后，岩石进入第二卸载阶段(*DE* 段)，其动态应力和应变均逐渐减小，其动态应变的恢复量即为此次冲击下的可恢复弹性变形。而水压力会增强岩石弹性能力，使其动态变形模量增加[23]，提高岩石的可恢复弹性变形，进而使 *DE* 段延长。综上，水压力对 *AB*，*BC*，*CD* 和 *DE* 阶段具有显著影响，这必然也会使岩石动态应力－应变曲线趋势发生改变。研究水力耦合作用下岩石动态应力－应变曲线随循环冲击次数的变化，有助于揭示水压力对岩石动态强度劣化特性的影响。

为探究水力耦合对岩石动态强度劣化的影响，基于图 5 中的数据，可得不同循环冲击次数下岩石的动态应力－应变曲线如图 7 所示。

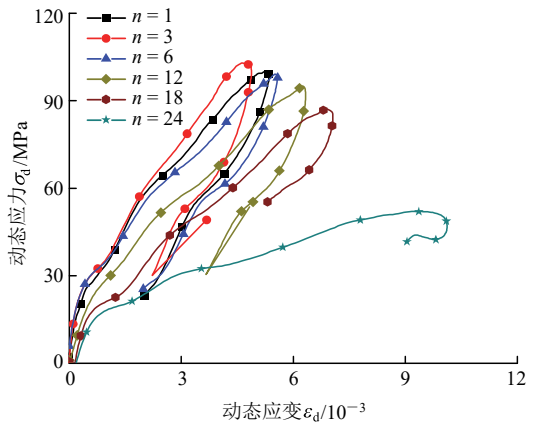
由图 7 可以看出，随着循环冲击次数的增加，岩石动态峰值应力逐渐下降。这表明，循环冲击会促使岩石微裂纹扩展，致使其强度劣化，最终造成岩石发生疲劳破坏。由图 7 还可以看出，随着循环冲击次数增加，岩石动态应力－应变曲线的 *BC* 阶段持续延长，*DE* 阶段缩短。分析认为，随着循环冲击次数的增加，单次冲击对岩石微裂纹扩展的促进作用增强，其可恢复的弹性变形减少，是造成 *BC* 阶段延长和 *DE* 段缩短的根本原因。当轴向静应力相同时，随着水压力的上升，岩石承受的总循环冲击次数增加，这主要归因于水压力对岩石动态强度的强化作用[22]。轴向静应力对岩石动态强度的影响效果则与水压力相反，增加其静态损伤，降低其抗冲击能力，导致高应力时岩石总循环冲击次数减少。依据此变化关系推测，轴向静应力达到某一阈值时，岩石会一冲即溃，甚至仅轴向静应力就能使其宏观破坏。



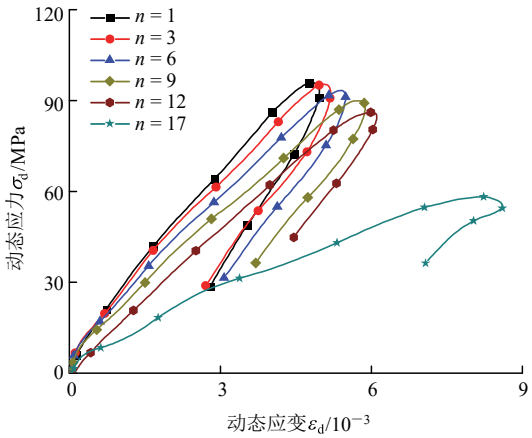
(a) σ_a = 36 MPa，σ_w = 3 MPa



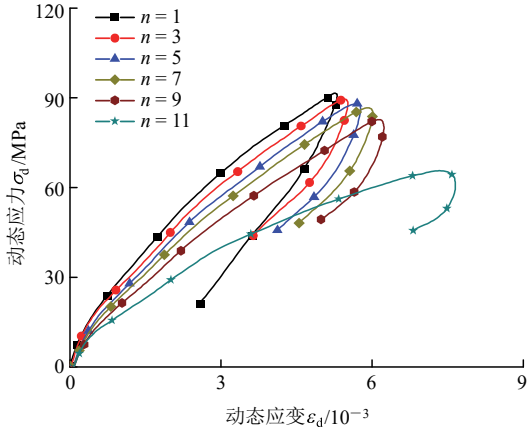
(b) σ_a = 36 MPa，σ_w = 6 MPa



(c) σ_a = 36 MPa，σ_w = 12 MPa



(d) σ_a = 45 MPa，σ_w = 12 MPa



(e) σ_a = 54 MPa，σ_w = 12 MPa

图 7　岩石动态应力－应变曲线

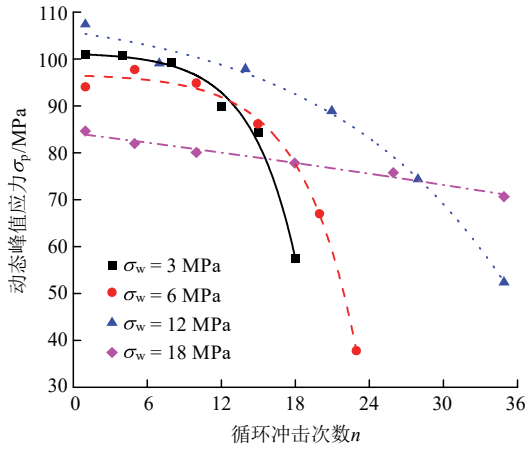
Fig.7　Dynamic stress-strain curves of rock

3　水力耦合岩石的强度劣化规律

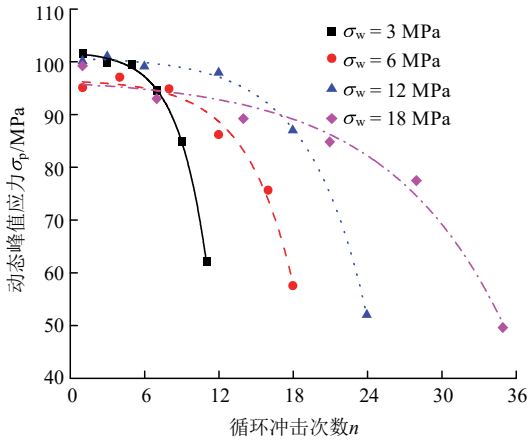
3.1　岩石动态峰值应力随循环冲击的变化规律

动态峰值应力σ_p是指岩石动态应力－应变曲线的最大应力值，表征特定赋存条件下岩石对动载荷的最大抵抗能力，与动态抗压强度不同；动态抗压强度是指岩石发生宏观破坏时的最大抵抗力。基于岩石动态应力－应变曲线，探究水力耦合岩石动态峰值应力随循环冲击次数变化关系，如图 8 所示。

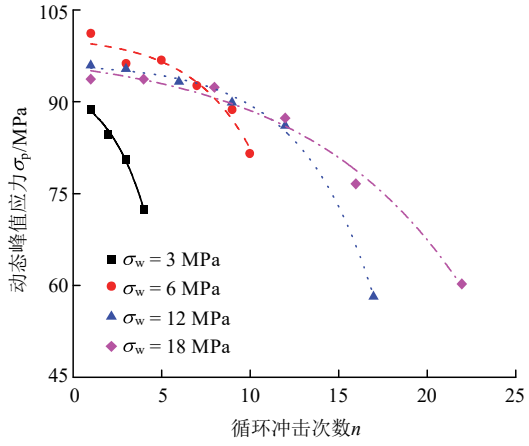
由图 8 可以看出，在不同工况下，随循环冲击次数的增加，岩石动态峰值应力均呈“缓慢下降－快速下降”的趋势，即在循环动载荷作用下岩石动态强度加速劣化。当轴向静应力相同时，随着水压力的增加，岩石动态峰值应力随循环冲击的劣化速率减慢，其“缓慢下降”阶段延长，表明水压力对岩石强度劣化具有强化作用。例如，当轴向静应力固定为 27 MPa 时，3 MPa 水压力的工况下岩石仅承受了 18 次冲击即发生宏观破坏，其“缓慢下降阶段”最短；水压力为 12 MPa 时，岩体总循环次数可



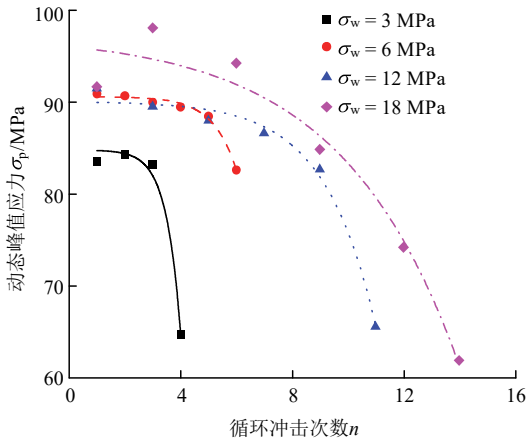
(a) σ_a = 27 MPa



(b) σ_a = 36 MPa



(c) σ_a = 45 MPa



(d) σ_a = 54 MPa

图 8　岩石动态峰值应力随循环冲击的变化规律

Fig.8　Dynamic peak stresses of rocks under cyclic impacts

达约 35 次(约为 3 MPa 工况的 2 倍)，其“缓慢下降阶段”显著延长。分析认为，水压力会降低岩石骨架承担的有效应力，并抑制其微裂纹的扩展[22]，进而增强岩石抗冲击能力，使动态峰值应力随循环冲击的劣化速率下降。为探究水压力和轴向静应力的耦合作用机制，以水压力与轴向静应力的比值(简称水压力的占比)为量化参数，探究水压力对岩石动态峰值应力的影响。当轴向静应力固定为 27 MPa，水压力为 3 MPa 时(水压力的占比为 0.11)，水压力远小于轴向静应力，其对岩石动态峰值应力的强化作用不明显；当水压力增加至 12 MPa(水压力的占比为 0.44)，水压力接近于轴向静应力的 1/2，其对岩石动态峰值应力的强化作用显著增加，使动态峰值应力的“缓慢下降阶段”延长；当水压力达到 18 MPa(水压力的占比为 0.67)时，岩石动态峰值应力几乎不存在“快速下降阶段”，其强度劣化被显著抑制。由此推测，当水压力超过某个临界值后，水压力的强化作用会抵消动载荷对岩石造成的动态损伤，使动态峰值应力不发生劣化。

由图 8 还可以看出，当水压力固定时，随着轴向静应力的增加，岩石承受的总循环冲击次数下降。例如，当水压力固定为 18 MPa、轴向静应力为 36 MPa 时，岩石承受 35 次冲击后发生破坏；而当轴向静应力增至 54 MPa 时，岩石仅需 14 次冲击即发生宏观破坏。分析认为，轴向静应力会促进岩石微裂纹的萌生和扩展，加快动态峰值应力随循环冲击的劣化速率，致使岩石更快发生宏观破坏。为探究轴向静应力对岩石动态峰值应力的影响，引入轴向静应力和岩石静态抗压强度的比值(简称为轴向静应力的占比)作为量化参数。当水压力固定为 18 MPa、

轴向静应力为 36 MPa(轴向静应力的占比为 0.46)时，岩石处于微裂纹稳定发展阶段，裂纹扩展速率缓慢，仍能承受较多的循环冲击次数；当轴向静应力增加到 54 MPa(轴向静应力的占比达到 0.69)时，岩石已接近或超过屈服点，其裂隙已部分连接成核，致使岩石可承受的循环冲击次数大幅减少。综上，随着轴向静应力增加，岩石动态峰值应力随循环冲击的劣化速率加快。屈服点是岩石强度劣化特性发生突变的关键节点：当轴向静应力接近或超过屈服点时，岩石抗冲击能力显著降低，表现为动态峰值应力更快进入“快速下降阶段”。

为探究水力耦合对岩石动态峰值应力劣化的影响，利用指数函数对图 8 中数据进行拟合分析[23]，建立水力耦合作用下岩石动态峰值应力的劣化经验模型：

$$\sigma_{\mathrm{p}} = \sigma_{\mathrm{p0}} - \sigma_{\mathrm{I}} \exp(s_{\mathrm{p}} n) \tag{1}$$

式中：σ_{p}，σ_{p0} 分别为动态峰值应力和初始动态峰值应力(MPa)；σ_{I} 为循环冲击对岩石动态峰值应力的影响系数(MPa)，其值越大表示循环冲击作用下岩石动态峰值应力的劣化量越大；s_{p} 为岩石动态峰值应力劣化的敏感性因子，其绝对值越大则岩石动态峰值应力和循环动载荷间的敏感性越高。

通过式(1)对不同工况下岩石动态峰值应力进行拟合，拟合曲线和参数如图 8 和表 1 所示。

表 1　动态峰值应力的拟合参数

Table 1　Fitting parameters of dynamic peak stress

σ_{w}/MPa	σ_{a}/MPa	σ_{p0}/MPa	σ_{I}/MPa	s_{p}	R^2
3	27	101.4	0.323	0.272	0.983
6		96.8	0.323	0.226	0.993
12		111.3	5.615	0.067	0.987
18		135.2	51.098	0.007	0.964
3	36	101.9	0.371	0.425	0.998
6		96.6	0.339	0.263	0.981
12		100.9	0.292	0.213	0.998
18		97.0	1.208	0.104	0.964
3	45	94.2	3.663	0.445	0.99
6		100.7	0.965	0.294	0.921
12		96.2	0.575	0.247	0.996
18		98.8	3.359	0.112	0.978
3	54	84.8	0.008	1.965	0.984
6		90.6	0.007	1.181	0.982
12		90.1	0.062	0.543	0.982
18		97.3	1.320	0.236	0.937

从图 8 可以看出，拟合曲线与岩石动态峰值应力的试验数据高度重合，相关系数(R^2)超过 0.91。这表明，岩石动态峰值应力随循环冲击呈式(1)所示的自然指数函数的关系变化。从图 8 和表 1 还可以看出，各工况岩石首次冲击的动态峰值应力和岩石初始动态峰值应力 σ_{p0} 数值相近，这验证了参数 σ_{p0} 的准确性。基于水力耦合作用下岩石动态峰值应力的劣化经验模型和表 1 中各拟合参数值，可预测岩体在多次爆破扰动作用下的动态强度，进而为突水灾害防治过程中动态劣化系数和动态增强因子等参数的计算提供支持。

综上，循环动载荷促使岩石发生动态损伤累积，降低其抗冲击能力，致使动态峰值应力呈指数函数的下降趋势。水压力可降低岩石骨架的有效应力，减慢岩石动态峰值应力随循环冲击的劣化速率；当水压占比增加时，其强化作用更显著。轴向静应力对岩石动态峰值应力的影响效果与水压力相反，随着轴向静应力的占比增加，岩石动态峰值应力随循环冲击的劣化速率上升。

3.2　岩石动态劣化系数随循环冲击的变化规律

由图 8 可以看出，随着循环冲击次数的增长，岩石动态峰值应力逐步劣化。动态劣化系数 δ 是量化动态峰值应力劣化速率的重要参数，其值越大表明单次冲击对岩石动态峰值应力的劣化作用越显著，其表达式[13]如下：

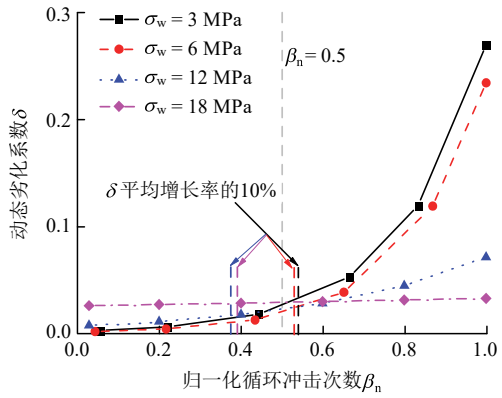
$$\delta = \frac{\sigma_{\mathrm{p}}(n-1) - \sigma_{\mathrm{p}}(n)}{\Delta\sigma_{\mathrm{p}}} = \frac{\Delta\sigma_{\mathrm{p}}(n)}{\Delta\sigma_{\mathrm{p}}} \tag{2}$$

式中：$\sigma_{\mathrm{p}}(n-1)$和$\sigma_{\mathrm{p}}(n)$分别为第 $n-1$ 次和第 n 次冲击时岩石的动态峰值应力；$\Delta\sigma_{\mathrm{p}}$ 为岩石的总劣化量，即破碎前岩石的动态峰值应力和首次冲击岩石的动态峰值应力的差值；$\Delta\sigma_{\mathrm{p}}(n)$为第 n 次冲击所造成的动态峰值应力劣化量，简称为第 n 次冲击的劣化量。

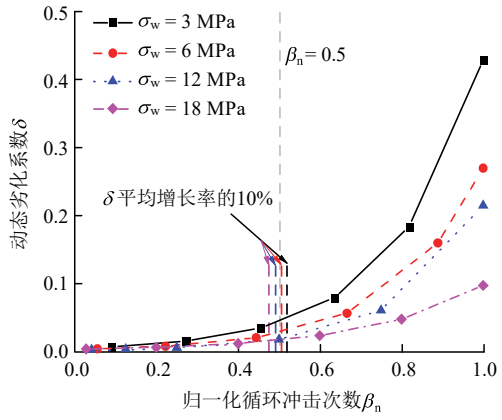
根据式(2)可知，动态劣化系数受总劣化量和第 n 次冲击劣化量的影响。通过对式(1)求导，可得岩石第 n 次冲击劣化量；结合式(2)，可得水力耦合作用下岩石动态劣化系数的表达式：

$$\delta = \frac{\sigma_{\mathrm{I}} s_{\mathrm{p}} \exp(s_{\mathrm{p}} n)}{\Delta\sigma_{\mathrm{p}}} \tag{3}$$

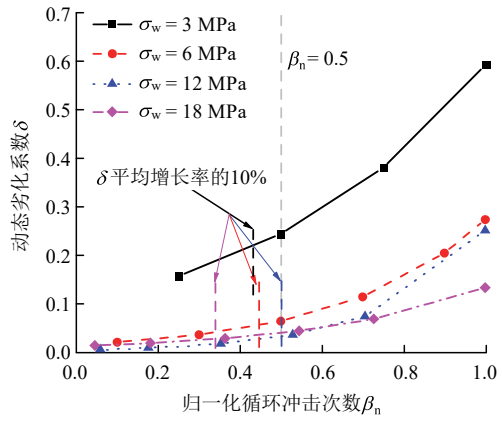
为便于比较水力耦合岩石动态劣化系数 δ 随循环冲击的变化，引入归一化循环冲击次数 β_{n}，探究水力耦合对岩石动态峰值应力劣化的影响。其中，β_{n} 为冲击次数与总循环冲击次数的比值；当 $\beta_{\mathrm{n}} = 1$ 时，对应的冲击次数即为该工况下岩石的疲劳寿命。根据图 8 和表 1 中的岩石总劣化量及各参数值，可得动态劣化系数 δ 随归一化循环冲击次数 β_{n} 的变化曲线，如图 9 所示。



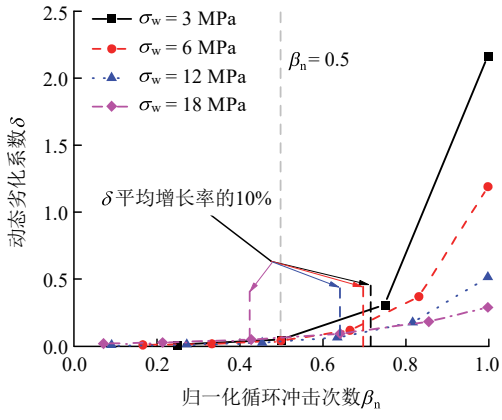
(a) σ_a = 27 MPa



(b) σ_a = 36 MPa



(c) σ_a = 45 MPa



(d) σ_a = 54 MPa

图 9　岩石动态劣化系数与归一化循环冲击次数的关系

Fig.9　Relationship between dynamic deterioration coefficients and the normalized number of cyclic impacts

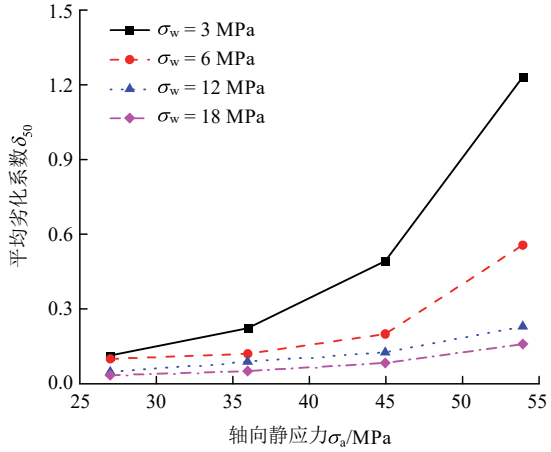
由图 9 可看出，随着归一化循环冲击次数 β_n 的增加，不同的轴向静应力和水压力下岩石动态劣化系数 δ 均呈现“缓慢增加－快速增长”的变化规律，该规律与干燥岩石动态劣化系数的变化趋势相似[13]。在最后 3 次循环冲击中，干燥岩石动态劣化系数呈现显著变化：其中，倒数第 3 次冲击对动态劣化系数的影响相对较小(增幅在 7.8%以内)，倒数第 2 次冲击的影响程度有所提升(增幅为 5%～10%)，而最后一次冲击导致动态劣化系数的增幅达 20%左右，部分工况甚至超过 40%[13]。尽管上述研究对岩石动态劣化系数的加速上升过程进行了探索，但未能系统揭示循环冲击全过程中岩石动态劣化系数的变化规律，且未明确界定岩石动态劣化系数由“缓慢增加”向“快速增长”阶段转变的临界阈值，这制约了岩石强度劣化特性的研究发展。

为分析 δ 增长趋势的变化规律，需明确其由“缓慢增加”向“快速增长”转变的临界阈值。在研究分析过程中，参数值变化的斜率是表征其变化速率快慢的常用方法。通过分析岩石劣化系数随归一化循环冲击次数变化的斜率发现，当岩石动态劣化系数增长率超过其平均增长率的 10%时，岩石劣化系数随归一化循环冲击次数的斜率出现显著变化。以轴向静应力为 27 MPa、水压力为 3 MPa 的工况为例，当岩石动态劣化系数的增长率低于其平均增长率的 10%时，其斜率约为 0.15；而当岩石动态劣化系数的增长率超过平均增长率的 10%时，岩石动态劣化系数的斜率显著提升至 1.8，后者斜率值为前者的 12 倍，表明动态劣化过程已进入快速增长阶段。基于此，将岩石动态劣化系数平均增长率的 10%定义为“缓慢增加”与“快速增长”的临界阈值；当 δ 的增长速率超过其平均增长率的 10%时，判定岩石动态劣化系数进入“快速增长”阶段。

如图 9 所示，不同水压力和轴向静应力工况下，岩石动态劣化系数从“缓慢增加”向“快速增长”阶段转变的临界阈值均出现在 β_n = 0.5 附近(对应疲劳寿命的 50%)。这表明，在循环动载荷作用下，岩石动态峰值应力的劣化过程存在显著的加速现象(简称为劣化加速现象)，即后 50%的循环冲击过程中岩石动态峰值应力的劣化速率显著上升。在实际工程中，通过式(3)可得深部岩体动态劣化系数 δ，进而判定岩体是否进入快速劣化阶段，为深部突水灾害防治(如局部堵漏)提供关键判据。

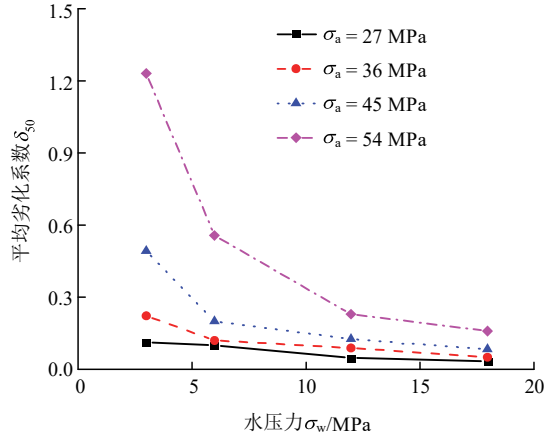
为分析水力耦合作用对岩石劣化加速现象的影响，计算后 50%次冲击下岩石动态劣化系数的平均

值(平均劣化系数)δ_{50}，得到 δ_{50} 随水压力和轴向静应力的变化规律，如图 10 所示。其中，δ_{50} 值越大意味着劣化加速现象越显著。



(a) 岩石 δ_{50} 与轴向静应力的关系

(a) Relationship between the average deterioration coefficient δ_{50} of rocks and axial static stress



(b) 岩石 δ_{50} 与水压力的关系

(b) Relationship between the average deterioration coefficient δ_{50} of rocks and water pressure

图 10　岩石 δ_{50} 随水压力和轴向静应力的关系曲线

Fig.10　Relationship curves of δ_{50} with water pressure and axial static stress

从图 10(a)可以观察到，水压力固定时，岩石 δ_{50} 随轴向静应力增加呈加速上升趋势。这说明，轴向静应力加剧岩石内部的应力集中效应，加快动态峰值应力随循环冲击的劣化速率，导致岩石的劣化加速现象更显著。由图 10(b)还可以看出，轴向静应力固定时，岩石平均劣化系数 δ_{50} 随着水压力呈加速下降的趋势。这表明，水压力对岩石动态强度起强化作用，削弱动载荷对岩石动态强度的劣化效果，降低动态峰值应力随循环冲击的劣化速率，从而削弱岩石劣化加速现象。

综上，在循环冲击作用下，岩石动态劣化系数加速上升；当循环冲击次数接近岩石疲劳寿命的 50%时，岩石动态劣化系数随循环冲击的增长速率加快，表现出劣化加速现象，即后 50%次循环冲击中动态峰值应力的劣化速率加快。随着水压力增加，岩石劣化加速现象减弱；随着轴向静应力增加，岩石劣化加速现象增强。

3.3　岩石动态增强因子随循环冲击的变化规律

岩石在高应变率条件下表现出动态强度增强现象，可通过动态增强因子(*DIF*)表征[14-15]；惯性效应是导致岩石动态强度增强的主要原因，也是水压力强化作用之一[14]。分析岩石 *DIF* 随循环冲击次数的变化，可反演岩体在多次爆破扰动作用下的惯性效应，为水压力对岩石强度劣化的影响机制研究奠定基础。其中，*DIF* 值越大意味着岩石在高应变率条件下的动态强度增强现象越显著，即水压力的惯性效应越强，其表达式如下所示[15]：

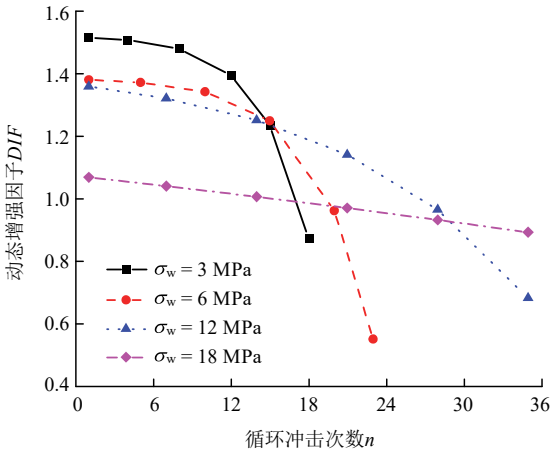
$$DIF = \frac{\sigma_{\mathrm{p}}}{\sigma_{\mathrm{c}}} \tag{4}$$

式中：*DIF* 为岩石动态增强因子，σ_{p} 为岩石动态峰值应力，σ_{c} 为岩石静态抗压强度(其数值详见节 2.3)。

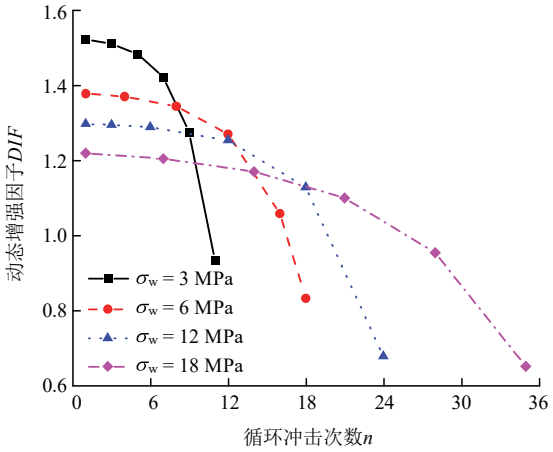
联立式(1)，(4)，可得水力耦合作用下岩石动态增强因子的表达式：

$$DIF = \frac{\sigma_{\mathrm{p0}} - \sigma_{\mathrm{I}} \exp(s_{\mathrm{p}} n)}{\sigma_{\mathrm{c}}} \tag{5}$$

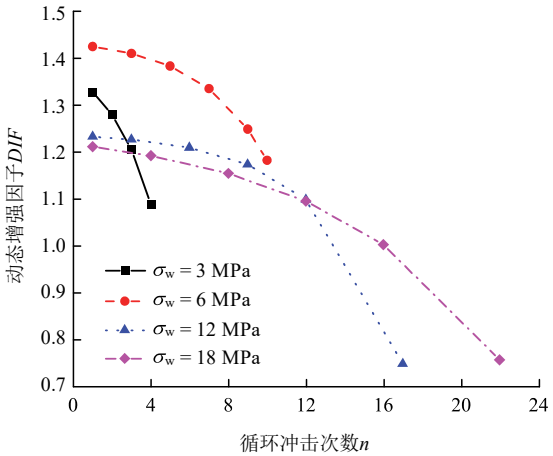
基于节 2.3 不同水压力条件下岩石的静态抗压强度和表 1 中拟合参数值，根据式(5)，可得水力耦合作用下岩石动态增强因子随循环冲击次数的变化规律，如图 11 所示，可以看出，首次冲击时，岩石动态增强因子(*DIF*)均大于 1，表明岩石动态强度高于静态强度。在动态加载过程中，岩石应变率快速增加、微裂隙快速起裂和扩展，引发惯性效应，导致其动态强度(动态峰值应力)增强[14-15]；在静态加



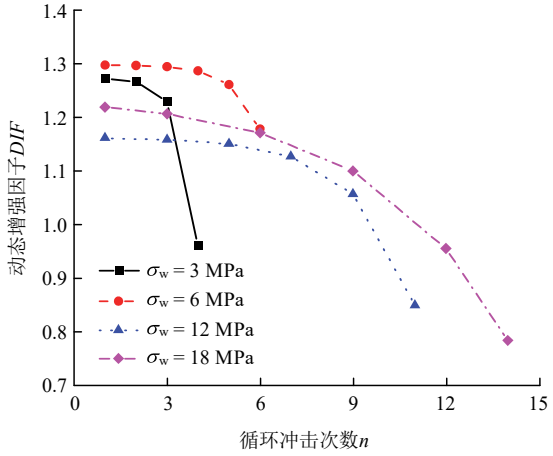
(a) σ_{a} = 27 MPa



(b) σ_a = 36 MPa



(c) σ_a = 45 MPa



(d) σ_a = 54 MPa

图 11　岩石 *DIF* 与循环冲击次数的关系

Fig.11　Relationship between *DIF* and the number of cycle impacts

载过程中，岩石应变率较低、裂纹发展相对缓慢，致使惯性效应对静态强度的影响微弱，进而导致岩石静态强度低于动态强度。

从图 11 可以看出，当循环冲击次数增加时，岩石 *DIF* 呈加速下降趋势，说明惯性效应呈减弱趋势。惯性效应会受岩石密度的影响，随着密度的增加，其影响效果逐渐增强[14]。在循环冲击过程中，岩石微裂纹的萌发和扩展导致其密度降低，从而削弱惯性效应的影响效果，使 *DIF* 加速下降。从图 11 还可以看出，当水压力固定时，随轴向静应力增加，岩石 *DIF* 随循环冲击的下降速率加快，即在高应力条件下岩石惯性效应更弱。根据节 3.1 结论可知，轴向静应力会加剧裂隙尖端的应力集中，增加单次冲击对岩石造成的动态损伤，使其密度快速下降，因此高应力条件下岩石 *DIF* 随循环冲击的下降速率加快。从图 11 还可以观察到，当轴向静应力保持不变时，随水压力的增加，岩石 *DIF* 随循环冲击的下降速率逐渐降低，但高水压条件下其速率变化不明显。这说明，水压力对岩石惯性效应的影响也具有双向性：一是水压力的强化作用通过抑制裂隙扩展降低岩石 *DIF* 随循环冲击的下降速度；二是水压力的弱化作用也随水压力的升高而增强[22]，抵消部分水压力的强化作用，致使高水压条件下岩石 *DIF* 随循环冲击的下降速率变化不明显。

综上，当循环冲击次数增加时，岩石动态增强因子(*DIF*)呈加速下降的趋势，说明其惯性效应不断减弱；水压力通过抑制岩石微裂纹扩展提高其惯性效应，进而减慢 *DIF* 随循环冲击的下降速率，但高水压其影响效果不明显。轴向静应力会增强单次动载荷对岩石造成的动态损伤，进而削弱其惯性效应，增加岩石 *DIF* 随循环冲击的下降速率。

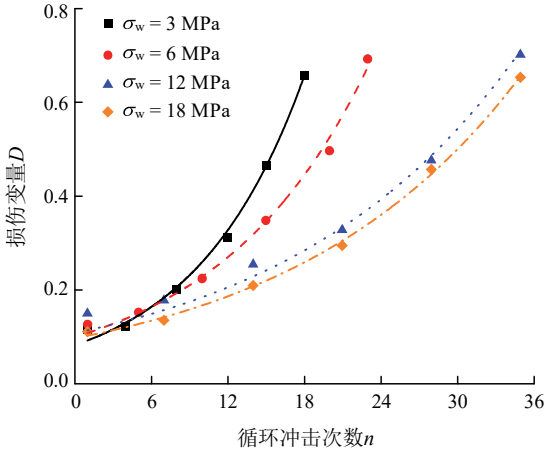
4　水力耦合岩石的强度劣化机制

4.1　岩石动态损伤累积规律

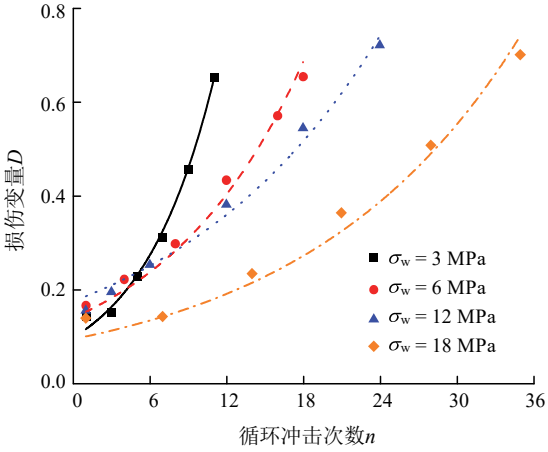
损伤变量 *D* 可表征岩石裂隙扩展和连接程度，反映其动态损伤累积程度，有助于探究水压力和轴向静应力对岩石强度劣化的影响机制。波阻抗可用于定义岩石的损伤变量，为量化岩石动态损伤累积程度提供方法[18]。基于波阻抗定义损伤变量的方法，可得水力耦合作用下岩石损伤变量随循环冲击次数的变化规律，如图 12 所示。

从图 12 可以看出，水力耦合作用下岩石损伤变量都呈现“缓慢上升－快速增长”的特征。损伤变量是反映岩石微裂纹扩展和贯通程度的重要参数，其值越大说明岩石裂隙发育程度越高。循环动载荷作用下，岩石裂隙发展过程可分“缓慢发展”与“连接成核”阶段，分别对应岩石动态峰值应力随循环冲击的“缓慢下降”和“快速下降”趋势(见图 8)。当循环次数较少时，岩石微裂纹处于缓慢发展阶段，

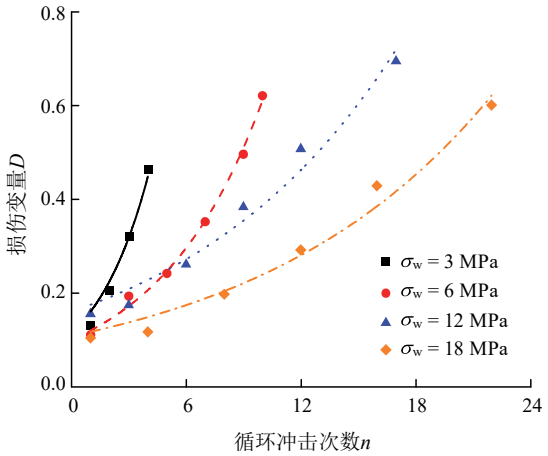
其内部裂隙具有“数量少”、“间距短”和“扩展速率慢”等特点，因此损伤变量呈“缓慢上升”的趋势。当循环冲击次数较多时，岩石微裂纹进入到连接成核阶段，其微裂纹快速连通并连接成片，导致岩石骨架承载力急剧下降，因此损伤变量呈“快速增长”的趋势。由图 12 还可以看出，当轴向静应力增大时，岩石损伤变量随循环冲击的上升速率显著提升，说明轴向静应力对岩石动态损伤累积程度具有促进作用；当水压增大时，岩石损伤变量随循环冲击的上升速率显著减缓，表明水压力对岩石动态损伤累积进程具有抑制作用。



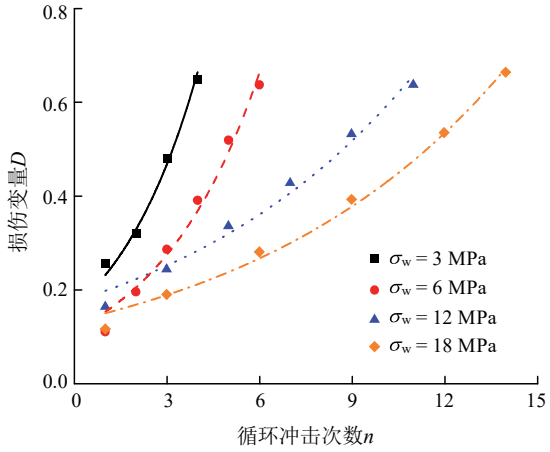
(a) σ_a = 27 MPa



(b) σ_a = 36 MPa



(c) σ_a = 45 MPa



(d) σ_a = 54 MPa

图 12　岩石损伤变量随循环冲击的变化规律

Fig.12　Relationship of damage variables with cyclic impacts

综上所述，在循环冲击荷载作用下岩石微裂纹发展呈“缓慢发展－连接成核”趋势。在缓慢发展阶段，岩石裂隙扩展速度低，导致损伤变量缓慢上升；在连接成核阶段，岩石裂隙扩展速度加快，促使损伤变量快速增长。

4.2　水力耦合岩石动态损伤累积模型

为探究水压力和轴向静应力对岩石的动态损伤累积的影响，选择指数函数对图 12 中的试验数据进行拟合[24]，构建水力耦合作用下岩石动态损伤累积模型：

$$D = \exp(D_a n - D_0) \tag{6}$$

式中：D 为岩石的损伤变量。当 n = 0 时，D_0 决定了 D 的大小。因此，将 D_0 定义为岩石初始损伤相关参数。D_a 为岩石损伤累积速率，其绝对值越大则损伤变量随循环冲击的增长速率越快，即单次动载荷对岩石造成的动态损伤越多。

通过式(6)对图 12 中的试验数据进行拟合，拟合曲线和参数分别如图 12 和表 2 所示。由图 12 和表 2 可以看出，拟合曲线与试验数据吻合度良好，相关性系数(R^2)高于 0.97，说明岩石损伤变量随循环冲击次数呈式(6)所示的自然指数函数关系变化。

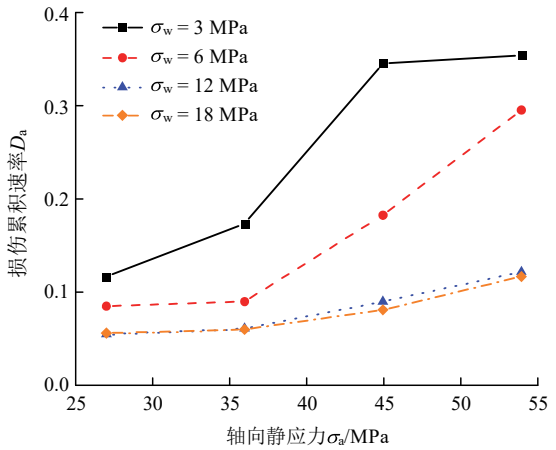
由节 3 可知，水压力和轴向静应力均会改变岩石裂纹扩展速度，这必然也会使其损伤累积速率 D_a 发生变化。为研究水压力和轴向静应力对岩石损伤累积速率的影响机制，根据表 2 中岩石损伤累积速率 D_a，可得岩石损伤累积速率随轴向静应力和水压力的关系曲线，如图 13 所示。

表 2　岩石动态损伤累积模型中的拟合参数

Table 2　Fitting parameters in dynamic damage accumulation model of rocks

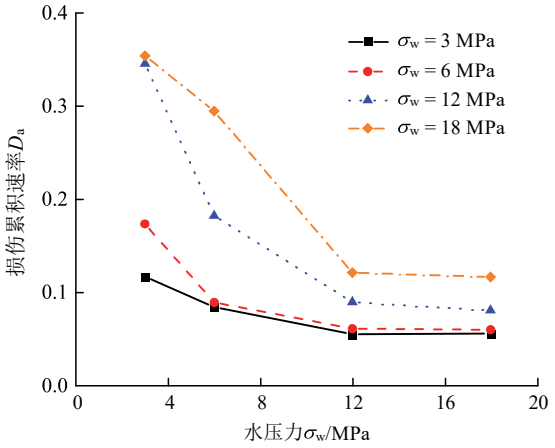
σ_w/MPa	σ_a/MPa	D_0	D_a	R^2
3	27	2.518	0.116	0.99
6		2.321	0.084	0.99
12		2.241	0.054	0.99
18		2.349	0.055	0.99
3	36	2.339	0.173	0.99
6		1.975	0.089	0.99
12		1.749	0.060	0.99
18		2.371	0.059	0.98
3	45	2.186	0.345	0.98
6		2.314	0.182	0.99
12		1.840	0.089	0.97
18		2.235	0.080	0.98
3	54	1.825	0.354	0.99
6		2.180	0.295	0.98
12		1.748	0.121	0.98
18		2.022	0.116	0.99

从图 13(a)可以看出，当轴向静应力增大时，岩石损伤累积速率逐渐增长。该现象表明，轴向静应力会增加岩石的裂隙扩展速率，从而使其损伤累积速率逐渐上升。从图 13(b)可以看出，当水压力增大时，岩石损伤累积速率先快速下降再缓慢下降。分析认为，水压力对于岩石微裂纹扩展的影响具有强化和弱化：一方面，水压力的强化作用会削弱单次动载荷引起的动态损伤，使其损伤累积速率下降；另一方面，水压力的弱化作用也会随水压力的升高而增强，削弱其强化作用的影响效果，使高水压时岩石损伤累积速率呈“缓慢下降”的趋势。



(a) 岩石 D_a 与轴向静应力的关系

(a) Relationship between damage accumulation rates D_a of rocks and axial static stress



(b) 岩石 D_a 与水压力的关系

(b) Relationship between damage accumulation rates D_a of rocks and water pressure

图 13　岩石 D_a 随水压力和轴向静应力的演化规律

Fig.13　Variation laws of D_a with axial stress and water pressure

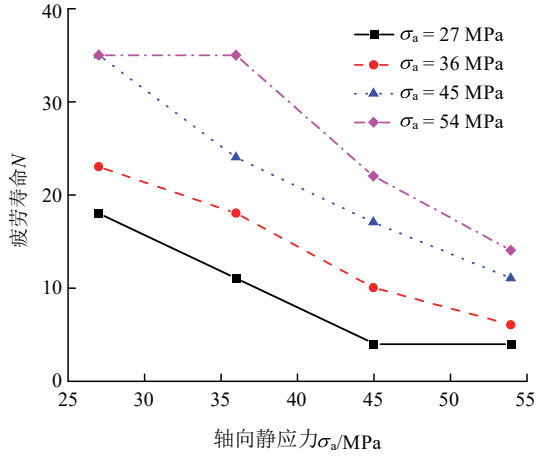
综上，水力耦合作用下岩石动态损伤演化模型相关性系数超过 0.97，可预测深部岩体在多次爆破扰动下的损伤变量。水压力会降低岩石损伤累积速率，但随着水压力增大，其影响效果减弱；而轴向静应力则会增加岩石损伤累积速率。

4.3　水力耦合岩石疲劳寿命的变化规律

疲劳寿命 N 是岩石在特定赋存环境和冲击速度下发生宏观破坏所需的总循环冲击次数，即循环冲击试验中岩石试件承受的最大冲击次数[19]，其主要受水压力、轴向静应力和冲击速度等因素影响。如节 3 所述，岩石内部损伤累积是其动态强度劣化的本质原因，而宏观破坏则是损伤累积至临界值的必然结果。研究固定冲击速度(9.8 m/s)下岩石疲劳寿命随水压力与轴向静应力的变化规律，构建相应疲劳寿命模型，既是后续不同冲击速度条件下疲劳寿命模型研究的重要基础，也为深部岩体突水风险预警与爆破参数优化提供关键支撑，具有重要工程应用价值。

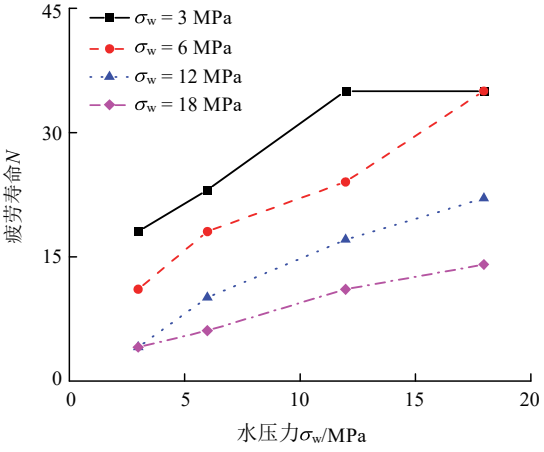
根据循环冲击试验数据，可得疲劳寿命随轴向静应力和水压力的变化规律，如图 14 所示。

由图 14(a)可以看出，在水压力恒定条件下，随着轴向静应力的增大，岩石疲劳寿命呈现递减的趋势，这一演化规律与干燥岩石的研究结果[13]存在显著差异。随轴向静应力的增加，干燥岩石疲劳寿命呈现“先上升后下降”的趋势[13]。分析认为，高应力条件下岩石疲劳寿命演化规律差异的核心根源在于岩石试件的含水率不同。由于干燥岩石内部存在



(a) 岩石 N 随轴向静应力的变化规律

(a) Variation law of fatigue life N with axial static stress



(b) 岩石 N 随水压力的变化规律

(b) Variation law of fatigue life N with water pressure

图 14　岩石疲劳寿命 N 随轴向静应力和水压力的演变

Fig.14　Evolutions of fatigue life N with axial stress and water pressure

天然可压缩孔隙结构，当轴向静应力较小时，岩石内部孔隙受挤压逐渐闭合，使其密度提升，增强其抗冲击能力，导致疲劳寿命先呈上升的趋势；但随着轴向静应力的增大，岩石孔隙压缩至极限后开始逐步扩展，使其骨架承载力降低，以致疲劳寿命下降。根据节 2.1 所述，水力耦合作用下循环冲击实验所用的试件为饱和红砂岩。由于孔隙水在动载荷作用下无法快速排出，岩石内部不存在可压缩的孔隙，未经历孔隙压密阶段。在轴向静应力的作用下，岩石微裂纹直接发生扩展，降低其抗冲击能力，导致疲劳寿命持续缩短。

由图 14(b)可以看出，在轴向静应力固定条件下，随着水压力的增加，岩石疲劳寿命增加。通过对比可知，水压力对岩石疲劳寿命的影响效果与围压相同[4]，但影响机制却存在差异。围压会抑制岩石的侧向变形，增强其抗冲击能力，致使疲劳寿命延长[4]。而水压力对岩石疲劳寿命的影响则源于裂隙间的微观机制，如图 15 所示。根据图 15 可知，Stefan 效应(裂隙扩展时孔隙水的黏性力)、弯液面效应(降低裂隙尖端的应力集中程度)和牛顿内摩擦效应(裂隙错动时孔隙水的黏性力)等微观机制会抑制微裂纹的扩展；此外，水压力会降低岩石骨架上承担的有效应力，削弱动载荷对其造成的动态损伤，使岩石疲劳寿命延长。

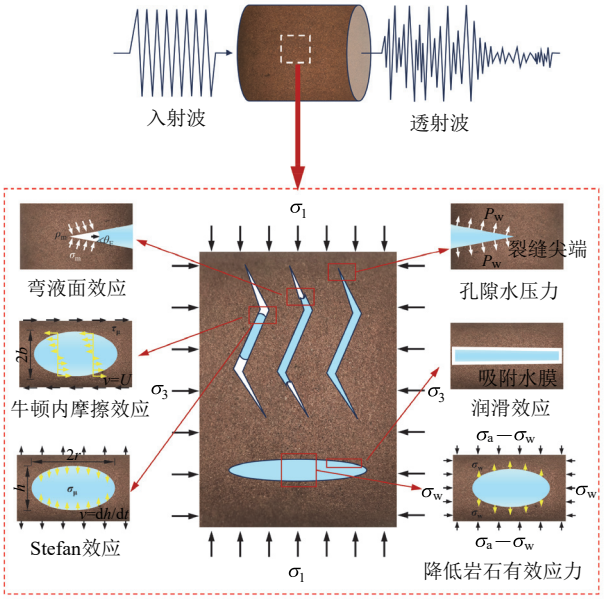


图 15　水压力对岩石裂隙的微观影响机制示意图

Fig.15　Schematic of microscopic mechanism of water pressure on rock fissures

综上所述，轴向静应力削弱岩石抗冲击能力，使其疲劳寿命缩短。水压力对岩石疲劳寿命具有强化作用，降低其骨架承担的有效应力，进而延长其疲劳寿命。通过水力耦合岩石疲劳寿命的演化规律，可反演深部岩体的疲劳寿命，为深部岩体工程灾害的防治提供理论支持。

4.4　水力耦合岩石疲劳寿命模型

由图 14 可以看出，水压力和轴向静应力是导致岩石疲劳寿命变化的关键因素。建立水力耦合岩石疲劳寿命模型，有助于精准预测深部岩体的疲劳寿命，为突水支护的设计提供支持。对图 14 中岩石疲劳寿命数据进行拟合，可得水力耦合岩石疲劳寿命模型的表达式如下所示：

$$N = \varphi_0 \exp(\delta_w \sigma_w + \delta_a \sigma_a) - N_0 \tag{7}$$

式中：N 为岩石疲劳寿命，即岩石从完整到破坏所

承担的总循环冲击次数，当轴向静应力和水压力为 0 时，岩石的疲劳寿命主要受 N_0 的影响，因此 N_0 可定义为岩石的初始疲劳寿命相关参数；φ_0 为岩石初始孔隙结构的相关参数，其值越大则表示天然岩石的微裂纹连接和贯通程度越高，即水力耦合作用下岩石裂隙更容易发生扩展；δ_w 为水压力对岩石疲劳寿命的影响参数(MPa^{-1})，定义其为水压力的敏感因子，其值越大则水压力和疲劳寿命之间的敏感性越高；δ_a 为轴向静应力对岩石疲劳寿命的影响参数，定义其为轴向静应力的敏感因子(MPa^{-1})，其值越大则轴向静应力和疲劳寿命之间的敏感性越高。

通过式(7)对图 14 中岩石疲劳寿命进行分析和拟合，拟合参数如表 3 所示。由表 3 可以看出，拟合参数的相关性系数(R^2)高于 0.93，表明岩石疲劳寿命随水压力和轴向静应力符合式(7)所示的自然指数函数变化关系。

表 3　岩石疲劳寿命的拟合参数及相关性系数

Table 3　Fitting parameters and correlation coefficients of fatigue life

N_0	φ_0	δ_w/MPa^{-1}	δ_a/MPa^{-1}
50.647 8	89.338 5	0.016 4	−0.010 7

注：相关性系数为 0.933 0。

为证明水力耦合岩石疲劳寿命模型的准确性，对不同的轴向静应力和水压力下红砂岩开展循环冲击验证试验。根据节 2.3 可知，在循环冲击试验中，水压力分别设置为 3，6，12 和 18 MPa，而轴向静应力分为设置为 27，36，45 和 54 MPa。为展现水力耦合作用下岩石疲劳寿命模型的可预测性，验证试验的水压力和轴向静应力值分别提升至 24 和 63 MPa，结果如表 4 所示。

表 4　岩石疲劳寿命验证试验结果及相对误差

Table 4　Verification test results and relative errors of rock fatigue life

编号(No.)	σ_w/MPa	σ_a/MPa	N_p	N_t	ξ_a	ξ/%
1	24	54	23.66	22	1.66	7.3
2	24	54	23.66	23	0.66	2.9
3	12	63	4.78	5	0.22	4.5
4	12	63	4.78	4	0.78	16.0

注：N_t 为红砂岩的疲劳寿命，N_p 为水力耦合岩石疲劳寿命模型的预测结果，ξ 为岩石疲劳寿命预测结果和试验结果之间的相对误差(%)，ξ_a 为岩石疲劳寿命预测结果和试验结果之间的绝对误差。

由表 4 可以看出，水力耦合作用下岩石疲劳寿命模型的预测结果和试验结果接近，绝对误差在 2 次以内，相对误差小于 16%。此外，2 组试验工况均进行了重复试验，能够在一定程度上排除试验误差和偶然性因素对验证结果的干扰。这些均可以证明，水力耦合作用下岩石疲劳寿命模型准确性高，可精确预测深部岩体的疲劳寿命，为突水灾害的预警和支护设计提供支持。

5　结　论

为研究水力耦合作用下岩石动态强度疲劳劣化特性研究，对水力耦合红砂岩开展循环冲击试验。分析岩石动态峰值应力、劣化系数、动态增强因子(*DIF*)和损伤变量随循环冲击的变化规律，探究水力耦合对岩石强度劣化的影响规律。提出水力耦合岩石动态损伤累积模型和疲劳寿命模型，揭示水压力和轴向静应力对岩石动态损伤演化和疲劳寿命的影响机制。得出的主要结论如下：

(1) 在循环动载荷作用下，岩石的动态峰值应力和动态增强因子(*DIF*)呈加速下降趋势，动态劣化系数和损伤变量则加速增长，表现出明显的强度劣化特征。当循环冲击次数接近岩石疲劳寿命的 50%时，动态劣化系数的增长速率显著提升，呈现出“劣化加速现象”。

(2) 轴向静应力会加快动态峰值应力和 *DIF* 随循环冲击的劣化速率，并促使动态劣化系数和损伤变量随循环冲击快速增长，增强其“劣化加速现象”。水压力会减缓动态峰值应力和 *DIF* 随循环冲击的劣化速率，并减慢动态劣化系数和损伤变量随循环冲击的上升速率，削弱其“劣化加速现象”。

(3) 水压力和轴向静应力对岩石疲劳寿命具有显著影响：随着水压力的增加，岩石疲劳寿命上升；随着轴向静应力的增加，岩石疲劳寿命逐渐下降。水力耦合岩石疲劳寿命模型误差小于 16%，准确性高，能精确预测不同水压力和轴向静应力工况下岩石的疲劳寿命。

由于深部岩体工程环境复杂且高水压环境难以模拟，导致水力耦合岩石动态强度疲劳劣化特性研究滞后于工程实际，进而造成疲劳寿命和动态劣化系数等关键参数难以准确获取，制约了突水灾害的防治和预警。本文聚焦水力耦合作用下岩石动态强度疲劳劣化特性，推导出水力耦合岩石动态劣化系

数的计算公式，并构建了水力耦合岩石疲劳寿命模型，为突水灾害防治提供关键参数支持。然而，本研究仅针对完整岩石试件开展了循环冲击试验，尚未探究裂隙状态(如裂隙角度、长度和宽度等)对岩石动态强度疲劳劣化特性的影响，导致研究结论的普适性存在一定局限。为进一步提升研究的普适性与工程指导价值，后续将研究重点聚焦于水力耦合作用下裂隙岩石动态强度疲劳劣化特性研究。

参考文献(References)：

[1] 谢和平，李存宝，高明忠，等. 深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(2)：217－232.(XIE Heping，LI Cunbao，GAO Mingzhong，et al. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2021，40(2)：217－232.(in Chinese))

[2] 李术才，许振浩，黄　鑫，等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(5)：1 041－1 069.(LI Shucai，XU Zhenhao，HUANG Xin，et al. Classification，geological identification，hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2018，37(5)：1 041－1 069.(in Chinese))

[3] 王春娟，刘建功，王金喜，等. 邯邢矿区承压水上充填采煤底板渗流规律研究[J]. 煤炭科学技术，2023，51(4)：140－148.(WANG Chunjuan，LIU Jiangong，WANG Jinxi，et al. The seepage law of confined water in floor of backfilling working face in Hanxing Mining Area[J]. Coal Science and Technology，2023，51(4)：140－148.(in Chinese))

[4] 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(1)：62.

[5] LIU K，ZHAO J. Progressive damage behaviours of triaxially confined rocks under multiple dynamic loads[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2021，54(6)：3 327－3 358.

[6] YANG F J，HU D W，ZHOU H，et al. Physico-mechanical behaviors of granite under coupled static and dynamic cyclic loadings[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2020，53(5)：2 157－2 173.

[7] 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)：1 070－1 079.(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)：1 070－1 079.(in Chinese))

[8] 刘　刚，李英明，肖福坤，等. 单、三轴及孔隙水作用下黄砂岩破坏力学行为及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(增 2)：3 532－3 544.(LIU Gang，LI Yingming，XIAO Fukun，et al. Study on failure mechanics behavior and damage evolution law of yellow sandstone under uniaxial triaxial and pore water action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2019，38(Supp.2)：3 532－3 544.(in Chinese))

[9] 金解放，孙俊涛，杨洪灏. 高水压对红砂岩动态强度和变形特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(10)：2 372－2 384.(JIN Jiefang，SUN Juntao，YANG Honghao. Experimental investigation of the influence of high water pressure on dynamic strength and deformation characteristics of red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(10)：2 372－2 384.(in Chinese))

[10] 平　琦，孙施佳，高　祺，等. 饱水裂隙砂岩动态力学特性与裂纹扩展规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(增 1)：3 131－3 139. (PING Qi，SUN Shijia，GAO Qi，et al. Study on dynamic mechanical properties and crack extension law of water-saturated fractured sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(Supp.1)：3 131－3 139.(in Chinese))

[11] WANG K，FENG G R，BAI J W，et al. Dynamic behaviour and failure mechanism of coal subjected to coupled water-static-dynamic loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2022，153(2022)：107084.

[12] ZHAO G L，LI X，XU Y，et al. A modified triaxial split hopkinson pressure bar(SHPB) system for quantifying the dynamic compressive response of porous rocks subjected to coupled hydraulic-mechanical loading[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources，2022，8(1)：2－15.

[13] 金解放，李夕兵，钟海兵. 三维静载与循环冲击组合作用下砂岩动态力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2013，32(7)：1 358－1 372. (JIN Jiefang，LI Xibin，ZHONG Haibin. Study of dynamic mechanical characteristic of sandstone subjected to three-dimensional coupled static-cyclic impact loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2013，32(7)：1 358－1 372.(in Chinese))

[14] ZHOU Z L，CAI X，MA D，et al. Water saturation effects on dynamic fracture behavior of sandstone(Article)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2019，114(2019)：46－61.

[15] YE H W，LI X W，LEI T，et al. Dynamic response characteristics and damage rule of graphite ore rock under different strain rates[J].

Scientific Reports，2023，13(1)：2 151.

[16] 陈　旭，肖　义，汤明高，等. 多级等幅循环荷载作用下砂岩变形、渗透及声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(8)：1 923－1 935.(CHEN Xu，XIAO Yi，TANG Minggao，et al. Experimental study on deformation，permeability and AE characteristics of sandstone under multi-stage cyclic loading with a constant amplitude[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(8)：1 923－1 935.(in Chinese))

[17] BAI J K，LI C M，FENG R M，et al. Effect of water content on the impact propensity of white sandstone[J]. Geofluids，2023，2023(1)：1－16.

[18] 金解放，李夕兵，殷志强，等. 循环冲击下波阻抗定义岩石损伤变量的研究[J]. 岩土力学，2011，32(5)：1 385－1 393.(JIN Jiefang，LI Xibin，YIN Zhiqiang，et al. A method for defining rock damage variable by wave impedance under cyclic impact loadings[J]. Rock and Soil Mechanics，2011，32(5)：1 385－1 393.(in Chinese))

[19] FAN LF，LI H，XI Y，et al. Effect of cyclic impact on the dynamic behavior of thermally shocked granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2024，57(7)：1－19.

[20] ULUSAY R. The ISRM suggested methods for rock characterization，testing and monitoring：2007～2014 [M]. Switzerland：Springer，2015：25－187.

[21] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京：中国计划出版社，2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 50266—2013 Standard for test methods of engineering rock mass[S]. Beijing：China Planning Publishing House，2013.(in Chinese))

[22] JIN J F，XIAO Y F，QIAN H，et al. Determination and evolution of dynamic viscosity coefficient of rock under high water pressure and high-stress conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2025，58(5)：1－18.

[23] 金解放，钱　豪，肖莜丰，等. 循环冲击作用下高水压岩石动态强度劣化特性试验[J]. 有色金属科学与工程，2025(待刊).(JIN Jiefang，QIAN Hao，XIAO Youfeng，et al. Experimental study on dynamic strength degradation characteristics of high water pressure rocks under cyclic impact loading[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering，2025，to be pressed.(in Chinese))

[24] DU Y C，SUN J G，JI C，et al. Effect of different loading sequences on low cycle fatigue of nickel-based superalloys[J]. Processes，2025，13(5)：1 477.

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章：

隧道工程安全预测和风险防控

(1) 高地温隧道热害链生机制与风险防控Ⅱ——致灾构造辨识与防控措施；

(2) 跨活断层隧道“强震－错动”耦合效应的物理模拟研究；

边坡和滑坡灾害研究

(3) 降雨－地下水耦合诱发花岗岩风化料路基边坡渗透破坏超重力模型试验研究；

(4) 基于贝叶斯网络的地震滑坡灾害链风险评估模型研究；

基础理论和试验研究

(5) 初始损伤对砂岩力学性能劣化的影响机理研究；

(6) 煤体强度对爆破致裂缝网跨界面扩展的影响规律研究；

陈宗基讲座论文

(7) 基于相场法的孔隙介质两相流体流动特性研究；

(8) 准负泊松比锚杆锚固抗力尺寸效应试验研究。

土工基础