

流固耦合作用下深部岩石动态力学响应研究进展

夏开文^{1,2}, 王 峥¹, 吴帮标¹, 徐 颖¹, 岳腾泷¹

(1. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 中国地质大学(北京) 地质安全研究院, 北京 100083)

摘 要: 深部岩石处于高地应力、高渗透压和强动态扰动的复杂地质环境之中, 3者作用下岩石体更加容易发生损伤破裂, 诱发突涌水、渗漏、井喷等工程地质灾害, 因而探究流固耦合作用下岩石的动态力学响应是开展岩石工程建设的前提之一。近年来, 国内外众多学者在考虑水和不同应力状态下的岩石动态力学实验研究方面取得了显著的成果。为给工程建设提供更加全面的指导并为后续研究奠定基础, 从实验装置、测试结果以及围压与水的作用机理层面, 对上述工作进行了回顾与总结。首先介绍了分离式霍普金森压杆测试装置的基本原理, 以及用于模拟深部岩石赋存环境所进行的装置改进, 包括围压分离式霍普金森压杆实验系统和孔压(渗透压)耦合的分离式霍普金森压杆实验系统, 简要分析了各类装置在研究流固耦合作用下岩石动力学问题时的优势和不足。其次, 总结了考虑不同应力状态(单向加载、三向围压加载)的流固耦合作用下岩石的动态力学响应特性。详细介绍了固定预设孔压、渗透压耦合作用下深部岩石的动态力学响应及其随孔隙水压、渗透压变化的规律。随后, 概述了围压对岩石动力学性质的影响机理, 分析了不同围压条件下的影响规律; 总结了水对岩石动态力学性质的强化、弱化微观机制和定量表达。最后, 对流固耦合作用下深部岩石的动态力学响应进行了概括总结, 并对未来实验研究工作和深部赋存条件下岩石动态力学的研究方向进行了展望。

关键词: 流固耦合; 岩石动力学; 分离式霍普金森压杆; 孔隙水压; 渗透压

中图分类号: TD311; TE371 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)01-0454-25

Research progress on dynamic response of deep rocks under coupled hydraulic-mechanical loading

XIA Kaiwen^{1,2}, WANG Zheng¹, WU Bangbiao¹, XU Ying¹, YUE Tenglong¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Institute of Geosafety, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Deep rock is under a complex geological environment with high geo-stress, high osmotic pressure, and strong dynamic disturbance, under the action of the three, the rock body is more prone to damage and rupture, inducing sudden water surges, seepage, blowouts and other engineering geologic hazards. Therefore, investigating the rock dynamics of the rock under hydraulic-mechanical coupling is one of the prerequisites for conducting rock engineering construction. In recent years, many scholars have obtained some fruitful research results in the study of rock dynamics properties under the consideration of water and different stress states. In order to provide more comprehensive guidance for engineering construction and facilitate the subsequent research, the above work is reviewed and summarized in terms of experimental

收稿日期: 2023-10-27 修回日期: 2024-01-08 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1381

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42141010, 42377147, 52079091)

作者简介: 夏开文(1973—), 男, 湖北孝感人, 教授, 博士。E-mail: kaiwen@tju.edu.cn

通讯作者: 吴帮标(1987—), 男, 湖北洪湖人, 副教授, 博士。E-mail: bbwu@tju.edu.cn

引用格式: 夏开文, 王峥, 吴帮标, 等. 流固耦合作用下深部岩石动态力学响应研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 454-478.

XIA Kaiwen, WANG Zheng, WU Bangbiao, et al. Research progress on dynamic response of deep rocks under coupled hydraulic-mechanical loading[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 454-478.



移动阅读

setups, test results, and the mechanism of the confining pressure and water content. Firstly, the basic principle of the split Hopkinson pressure bar (SHPB) system and the device improvements used to simulate the deep rock storage environment are introduced, including the confinement-coupled SHPB system and pore-pressure (osmotic pressure)-coupled SHPB system. The advantages and shortcomings of each type of device in the study of rock dynamics under hydraulic-mechanical coupling are briefly analyzed. Secondly, the dynamic mechanical response characteristics of rocks hydraulic-mechanical coupling considering different stress states (uniaxial confining, triaxial confining) are summarized. The dynamic mechanical response of deep rocks under fixed preset pore pressure and osmotic pressure coupling and its law of variation with pore water pressure and osmotic pressure are described in detail. Subsequently, the mechanism of confining pressure on the dynamic properties of the rock is outlined, and the influence law under different stress states is analyzed. The strengthening and weakening microscopic mechanism and quantitative expression of the dynamic mechanical properties of the rock by water are recapped. Finally, the dynamic response of deep rocks under hydraulic-mechanical coupling is summed up, and the further experimental research work and the research direction of deep rock dynamics are proposed.

Key words: hydraulic-mechanical coupling; rock dynamics; split hopkinson pressure bar; pore pressure; osmotic pressure

深地工程常涉及深部岩体的稳定性问题,而深部岩体处于“三高一扰动”的复杂地质环境中^[1-3],在施工过程中不可避免地将会发生损伤破裂而失稳,从而引发各类工程地质灾害,严重危害施工人员生命安全,影响工程质量和进度^[4-7]。其中,深部岩体在高地应力、高渗透压和动态扰动 3 者耦合作用下最易发生损伤破裂,在工程中诱发突涌水、渗漏、井喷等工程地质灾害的概率较大,危害较深^[1,8]。这类地质问题主要诱因,一方面是由于外部动态荷载作用于岩体之上,改变岩体本就复杂的应力场分布,影响岩体的结构,引起岩体中水的作用强度、范围及形式发生改变^[9-10];另一方面,由于外部作用,形成扰动下的流体渗流场反过来又作用于岩体之上,最终影响岩体的稳定性^[11-12]。因此,可将这类问题归结为动态荷载作用下的岩体流固耦合问题。

因忽视流固耦合作用下岩体的不稳定性,不同工程领域的地质灾害给人类发展留下了深刻教训。例如,在水利工程领域,位于法国南部的 Rayran 河上的 Malpasset 拱坝于 1959 年发生了严重的溃坝事故,此事件是世界第 1 起拱坝溃坝事件,事后大多数专家认为是由于大坝蓄水后,水体渗入拱坝坝踵处岩体的裂隙,裂隙水压致使左坝肩至 F1 断层的岩体失稳,从而导致大坝溃决^[13-15]。在采矿工程领域,1984 年开滦范各庄矿 2171 工作面发生了世界采矿史上罕见的透水事故,奥陶系灰岩强含水层承压水溃入矿井,涌水量最高达到极为罕见的 2 053 m³/min。在油气田开采领域,2000 年重庆开县发生的“12·23”特大井喷事故,富含硫化氢的天然气猛烈喷射 30 多米高,事故造成 243 人因硫化氢中毒死亡……据不完全统计,在我国所发生的尾矿坝溃坝事故中,由渗透破坏、浸润线高等原因所引发的溃坝事故占比约为 55.4%^[16];在我国

的煤矿开采过程中,时常发生的瓦斯突出事故、水灾事故占有所有煤矿事故的比例约为 56.1%^[17];在我国的隧道施工过程中,透水突水事故占总事故比例约为 10.4%^[18];在我国的油气田井下作业事故中,井喷事故占总事故比例约为 5.7%^[19],可见流固耦合问题已经成为了严重危害各类岩体工程安全的主要问题。

然而,合理地利用岩体流固耦合机理,不仅可以避免工程地质灾害的发生,还能有利于地下资源的开采。例如合理采用增渗技术,可以提高油气田的采收率等^[20]。目前对储层改造增渗的唯一技术措施是力学方法,其中就包括静力学或动力学方法^[21]。在静力学方法中以流体压裂为主要方法,但是该方法有压裂效果难以控制、压裂液对储层造成损伤导致渗透率降低、压裂液泄露导致地层污染、成本高昂等缺点。以邱爱慈院士团队所研发的“高聚能重复强脉冲波煤储层增渗新技术”为典型代表的动力学方法在克服上述缺点的同时可实现可控脉冲加载的增渗作业^[21-22]。因此,深入研究深部工程岩体流固耦合问题,尤其是在动态扰动下的流固耦合问题,对于灾害防治和产业增效具有重要的科学指导意义。

在流固耦合作用下深部岩石动力学响应的研究中,岩石的动态应力应变特性和变形破坏特性是 2 项主要的研究内容。室内实验是研究的重要手段,这其中分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 由于操作方便、实用性强和可控性好等优点被广泛用于中高应变率 ($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$) 下的岩石类材料力学性能的研究,经过对装置改造和试样设计,可以对岩石材料的动态压缩、拉伸、剪切、断裂性质进行测试^[23-32]。对此,国内外众多学者已从 SHPB 的结构组成、不同力学性质的测试方法与结果等方面进行了

系统的总结^[3, 33-34]。针对深部岩石高地应力的赋存条件,有学者还开发了不同类型的可施加围压的 SHPB 系统,通过组合施加侧向围压与轴向围压或者基于真三轴设备施加三向不等荷载,可实现复杂应力条件的模拟和静动荷载的耦合,相关成果也有较为全面的讨论总结^[10, 35-36]。

另外在上述设备和试验方法的基础上,不少学者将水力作用纳入考量,使用煮沸法^[37]或者浸泡法^[38-40]处理试样,并通过含水试样质量^[41-42]或者浸泡时间^[43-45]计算、控制岩石的含水率,测定了不同饱水状态下的岩石动力学性质。但可预见的是这种水力耦合方法并不能实现岩体内部孔隙水压的定量表征和深部赋存环境中渗透压条件的模拟,只能根据实验现象对水的影响进行定性描述。因此有学者探索开发了可控孔压(渗透压)围压的 SHPB 测试系统,定量考虑了孔隙水压力和渗透压的影响,进一步研究了流固耦合作用下深部岩石的动态力学响应^[46]。

笔者从分离式霍普金森压杆(SHPB)实验装置的工作原理和数据分析出发,介绍为实现研究深部岩石动力学性能而采用的测试装置,包括常规三轴围压 SHPB 系统、真三轴围压 SHPB 系统和流固耦合 SHPB 加载实验系统。其次,总结了在单向和三向围压应力状态水岩耦合作用下岩石动力学性质的测试结果,展示了可控孔压、渗透压加载下深部岩石的动态响应。最后,总结了围压、水影响岩石动态力学性质的作用机理,展望了流固耦合作用下深部岩石动力学的发展方向。

1 分离式霍普金森压杆(SHPB)基本原理及流固耦合实验装置

分离式霍普金森压杆实验系统(SHPB)在材料动态力学性能测试领域具有广泛应用,其基本思想是利用试验杆中传播的应力波同时承担加载和测试的功能,根据杆中的应力波传播信息求解杆件与试样接触面的力-位移-时间关系,从而得到试样的响应^[47]。自1949年KOLSKY提出完整的实验理论及数据处理方案,经过数十年的发展,SHPB已经成为国际岩石力学学会推荐的岩石动力学测试方法所采用的加载设备^[48]。并且经过改装测试,SHPB已经可以实现对岩石类材料开展不同围压、孔压、渗透压条件下的动态力学测试^[24, 46, 49-50]。本节从SHPB的基本原理出发,介绍为探究复杂应力状态及孔压或渗透压耦合作用所进行的技术改进。

1.1 SHPB 系统基本工作原理

分离式霍普金森压杆实验装置主要包括:气枪、

撞击杆、入射杆、透射杆和阻尼器等部件。实验过程中,撞击杆被气枪内突然释放的高压气体驱动并高速撞击入射杆末端,产生在两杆件中传播的压缩应力波。入射杆中的压缩波传播至试样处,由于试样与杆件之间的波阻抗存在差异,压缩波部分发生反射形成拉伸波,其余压缩波透过试样再传入透射杆。各列应力波在杆件中一维传播,引起杆件的弹性应变,如图1所示。

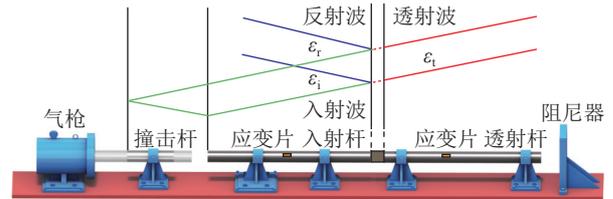


图1 SHPB装置示意及波系^[9]

Fig.1 Schematic of an SHPB system and $x-t$ diagram of stress wave propagation^[9]

利用试验杆中的应变信号,可计算出动态加载过程中试样两端的位移和应力。将试样的入射端设为端面A,透射端设为端面B。根据一维弹性波的线性叠加原理,试样两端的位移 U_A 和 U_B 可表示为

$$U_A = c_0 \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r) dt \quad (1)$$

$$U_B = c_0 \int_0^t \varepsilon_t dt \quad (2)$$

式中, c_0 为杆件的纵波波速; ε_i 、 ε_r 和 ε_t 分别入射波、反射波和透射波在杆件中独立传播所引起的轴向应变; t 为加载时间^[47]。

根据轴向变形均匀性假定,设试样的原始长度和横截面面积分别为 l_0 和 A_0 ,则动态加载过程中试样的平均轴向应变 $\varepsilon(t)$ 为

$$\varepsilon(t) = \frac{U_A - U_B}{l_0} = \frac{c_0}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (3)$$

对平均轴向应变在时间上进行求导,则得到试样的平均应变率 $\dot{\varepsilon}$ 为

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c_0}{l_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (4)$$

设杆件的弹性模量和横截面面积分别为 E 和 A ,则试样两端所承受的荷载分别为 F_A 和 F_B :

$$F_A = EA(\varepsilon_i + \varepsilon_r), \quad F_B = EA\varepsilon_t \quad (5)$$

则试样中的平均应力为

$$\sigma(t) = \frac{F_A + F_B}{2A_0} = \frac{EA}{2A_0} (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (6)$$

需要注意的是,当试样两端受力平衡时,即 $F_A = F_B$, $\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$,试样内部的动态惯性效应才可以被忽略。

因此应力平衡是评判一次动态加载试验数据是否有效的重要标准, 在应力平衡的前提下, 式 (3)~(5) 可改写为式 (7)~(9), 进而可以根据反射波和透射波求得试样的应力应变响应^[48]。

$$\varepsilon(t) = -\frac{2c_0}{l_0} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_0}{l_0} \varepsilon_r \quad (8)$$

$$\sigma(t) = \frac{EA}{A_0} \varepsilon_t \quad (9)$$

1.2 围压 SHPB 系统

深部岩石在天然赋存时受到地应力作用, 加之天然节理的存在和工程开挖等因素均会改变岩石的应力状态, 因此研究围压作用下岩石的动态力学响应是

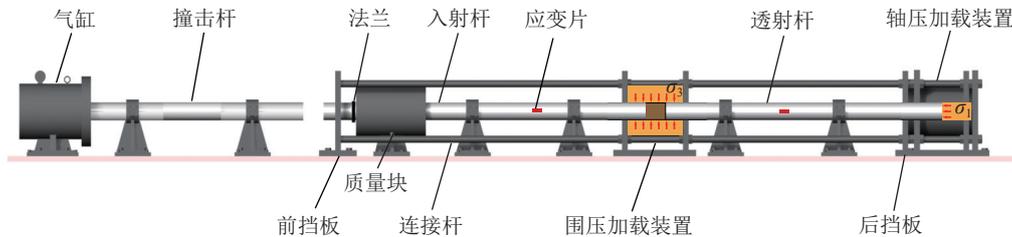


图 2 可控围压的 SHPB 装置示意^[32, 48, 51-53]

Fig. 2 Schematic of SHPB system with an active and controllable triaxial confinement^[32, 48, 51-53]

理论上, 通过调节 2 个加载装置的压力, 轴向、侧向围压相互配合, 可以实现轴向围压、侧向围压、静水压和三轴应力 4 种压力状态下试样的动态加载^[10]。但实际上, 侧向围压的应力状态较难实现。众多学者使用此类设备进行了大量的轴向围压、静水压以及三轴应力状态的岩石动态力学特性研究^[10, 24]。

使用围压 SHPB 实验系统对试样施加侧向围压时, 除需将试样和杆件在围压装置内密封外, 为防止试样与承压流体 (如液压油) 发生物理化学反应, 需要对试样进行隔离。常用的隔离方式有在油-岩之间增加橡胶隔层和使用隔离技术对试样表面进行处理等^[9]。无论何种隔离方式, 在围压作用下试样都处于不排水的受载条件, 这导致含水试样在受到外荷载时, 试样内部孔隙水压力增高, 岩石骨架处于围压、孔压和动态荷载耦合的复杂应力状态, 这是笔者将此类考虑试样含水状态的实验研究归类为流固耦合问题的原因。但是孔隙水压是由于围压和动态荷载的施加而产生, 孔隙水被动承担部分荷载, 因此岩石材料所受围压以及孔隙水压都不恒定。另外有学者使用水作为围压装置内的承压流体, 并使试样与水直接接触, 以研究不同水压和轴压作用下岩石的动态力学响应^[54-55]。这种方法除了存在上述问题外, 高压水在加载过程中

必要的。常规的分体式霍普金森压杆仅能够实现对于样品的单轴加载, 其对深部岩石应力状态进行有限模拟的同时也限制了其在深部岩石力学的应用, 国内外学者对传统的 SHPB 实验装置进行改造, 实现了对试样进行可控围压或静水压下的动态加载^[24, 27, 49-50]。

1.2.1 常规三轴围压 SHPB 系统

常规三轴围压 SHPB 系统是一种主动围压 SHPB 实验系统, 使用该系统加载, 试样所受侧面压力相等, 即 $\sigma_2 = \sigma_3$ 。围压的施加方式在于将试样和部分杆件密封于充满承压流体介质 (如液压油、高压气体) 的围压装置内, 通过外源的加压装置施加压力, 从而实现对试样的侧向加载。如图 2 所示, 在透射杆尾部加设轴压施加装置, 同样依靠外源加压装置对内部承压流体加压, 配合连接杆和前后挡板组成的限位装置, 可对试验杆—试样施加轴向应力。

向试样内部的渗透使得水岩耦合作用更加复杂, 难以量化。同时使用此方法模拟的条件并不符合深部岩石的天然赋存状态, 因此笔者对于使用此方法的测试结果并未予以讨论。

1.2.2 真三轴围压 SHPB 系统

面对深部赋存条件以及开挖卸荷等工程扰动后复杂的地应力环境, 有学者基于静态真三轴加载装置改进了真三轴围压 SHPB 实验系统。从 2009 年设计理念提出^[56], 经过十数年发展, 真三轴围压 SHPB 实验系统已经在包括深部岩石动力学在内的多个领域应用^[57-60]。实验时, 将加工成固定边长的立方体试样夹置在 6 根截面为方形的杆件中间, 使用液压系统对试样施加 x 、 y 、 z 等 3 个方向的静载围压。通过气压推动撞击杆撞击入射杆的末端, 施加单一方向的动态荷载。入射杆中的部分应力波在与试样接触的末端发生反射形成反射波, 部分穿过试样在加载方向的透射杆中形成透射波, 在另外 2 个方向的压杆中形成出射波^[61]。

除撞击杆高速撞击外, 部分研究中还采用其他方法模拟产生动态扰动。如 DU 等^[62]和 SU 等^[63]在加载面中间开孔并通入等大的扰动杆, 通过控制扰动杆的高频运动和改变扰动杆的端部形状施加不同的动态

扰动荷载; XIE 等^[64]发明了电磁真三轴围压系统, 该设备通过电磁加载三向精准可控的应力脉冲, 使三向原位应力与三向动态扰动耦合的应力状态具有可复制性; LIU 等^[65]则将动态施加单元与静载液压模块进行耦合, 在静载施加的同时可以产生 12 种波形的动态扰动荷载。各种动态荷载施加方法如图 3 所示。通过应变片等传感装置测得加载杆件中的应变信号, 结合应力波的理论可以计算试样 3 个方向的应力应变响应。

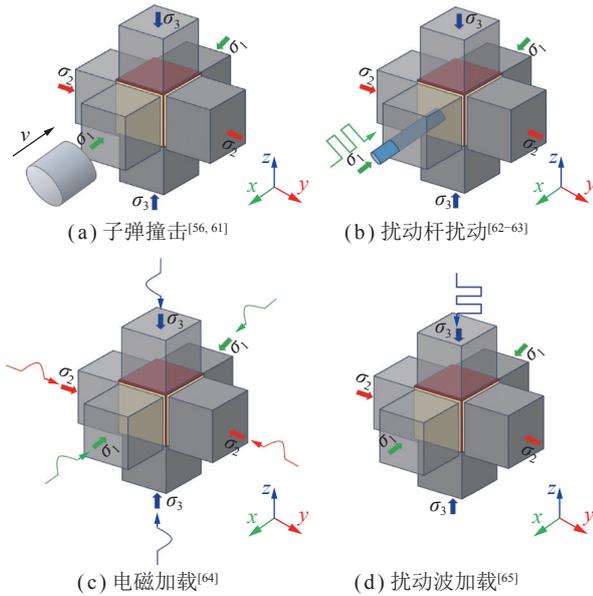


图 3 真三轴围压及动态加载方式

Fig.3 True triaxial confinement and different methods of dynamic disturbing

由于可实现三向独立可控加载, 真三轴围压 SHPB 系统在模拟复杂应力状态时具有一定优势。实验时通常固定 2 个方向预加静载, 通过改变第 3 个方向的

压力值来模拟不同的三轴应力状态。值得注意的是, 测试过程中试样所受围压并不恒定。这是因为试样所受静载外, 与加载方向垂直杆件中的出射波同样会导致试样受到额外的侧向压力, 这导致真三轴围压试验在数据解释方面存在一定困难^[49, 64]。另外, 考虑加载过程中试样的变形, 防止冲击过程中杆件的相互碰撞摩擦导致波形的紊乱, 试样与杆件之间设置有边长较小的方形金属垫片, 这导致试样并未处于完全封闭状态^[56]。试样各个表面均存在裸露且不直接受力的区域, 这对试样内部分裂发展 and 孔隙水流动存在一定的导向作用, 从而对含水岩石的动力学响应测试结果产生一定的干扰^[66]。

1.3 流固耦合 SHPB 加载实验系统

上述围压 SHPB 虽然能够模拟深部岩石的复杂地应力环境, 但不能实现深部环境中孔隙水压的可控调节和渗透压的定量模拟。HUANG 等^[67-68]从液体充填节理出发, 研发了固着于含节理的岩石试样侧表面并能向节理充水的辅助装置, 对不同注水节理厚度、角度下的应力波传播进行了研究, 但对于岩石材料本身的动力学响应并未讨论。为研究深部岩体在高地应力、高孔隙水压或渗透压以及动态扰动耦合作用下的稳定性和力学响应, 天津大学通过对传统的 SHPB 系统进行改进, 自主研发了一套可控孔压 (渗透压) 的流固耦合 SHPB 加载测试系统^[46]。该系统如图 4 所示, 在围压和轴压加载系统之上增加了孔隙水压加载系统, 该系统主要由伺服控制水压加载装置、导杆、密封法兰、金属水管等部件组成, 可与常规三轴围压 SHPB 动态加载测试系统进行组装, 具有较高的适配性。

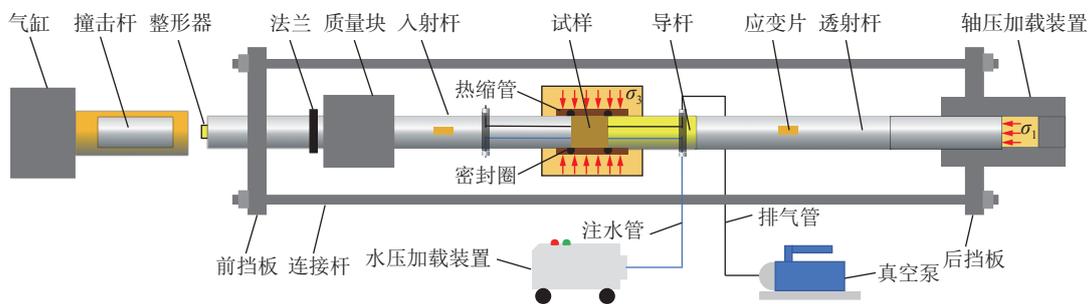


图 4 天津大学 50 mm 围压-渗透压耦合 SHPB 加载实验系统

Fig.4 A 50 mm diameter SHPB system developed by Tianjin University with coupling of pore pressure (osmotic pressure) and confining pressure

导杆为孔隙水压加载系统的核心部件, 其与入射杆、透射杆的具有相同的材质和直径, 与杆件同轴放置, 穿过围压装置置于入射杆和透射杆之间, 前端用于夹持试样, 后端与透射杆紧密接触。导杆的内部结构经过特殊设计, 如图 5 所示。在导杆的夹持试样端面

设置有若干条导水槽, 其作用是使水压在试样的端面均匀分布。此外, 还从导杆端面的导水槽处选取径向对称的两点, 从两点沿导杆轴向设计两条通道, 出口用法兰密封。其中一条为排气通道, 实验注水前通过密封法兰与真空泵连接, 用于抽排出岩石孔隙和密封热缩

管中的多余空气; 另一条为孔隙水压加注通道, 实验时通过密封法兰和金属水管与水压加载装置连接, 用于对岩石孔隙加注水压, 2 条通道均由各自的阀门进行控制。伺服控制水压加载装置是施加水压的主要设备, 其由计算机控制, 可进行恒定水压、恒定流速和恒定流量等模式的伺服控制, 可实时记录水压、水压推杆位移、流量等参数, 最大控制水压可达 40 MPa。

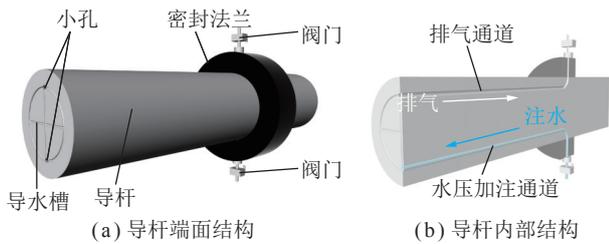
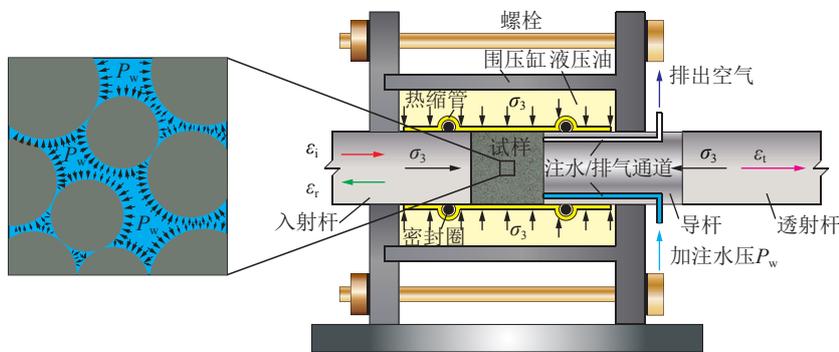


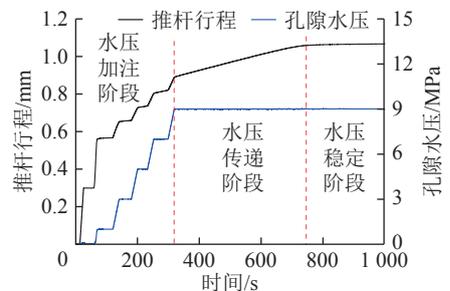
图 5 导杆及其结构示意图^[46]

Fig.5 Schematics of the connecting rod

为提供完整的渗流通道, 实现可控渗透压下的围压动态加载实验, 需要在加入孔隙水压加载系统的基础之上, 对入射杆进行改造。特制的入射杆夹持试样端的端面上设计与导杆端面上相同的导水槽, 并同样过导水槽沿杆件轴线方向设置两通道, 通道出口位于围压装置外部以便排水。



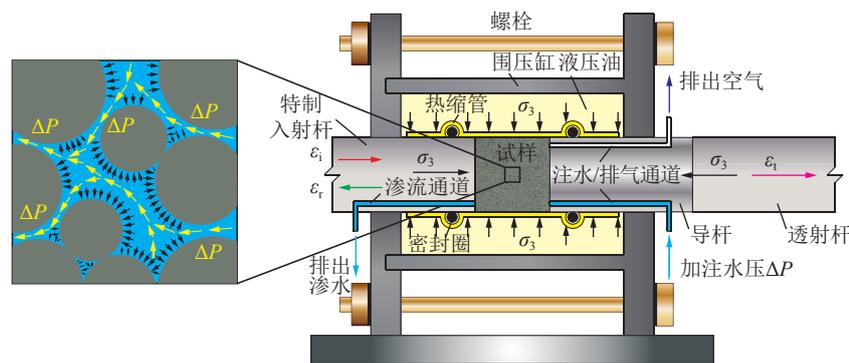
(a) 孔压耦合作用下的岩石动态加载测试示意



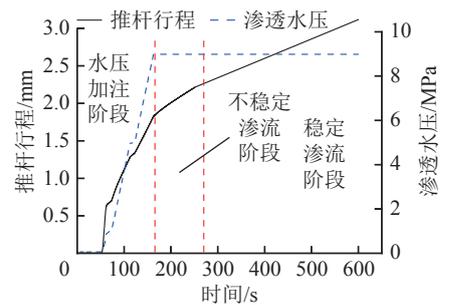
(b) 水压加载时程曲线与推杆行程曲线^[46]

图 6 可控孔压-围压动态加载实验

Fig.6 Controllable pore pressure-confining pressure dynamic loading experiment



(a) 渗透压耦合作用下的岩石动态加载测试示意



(b) 渗透压加载时程曲线与推杆行程曲线

图 7 可控渗透压-围压 SHPB 实验系统

Fig.7 Controllable osmotic pressure-confining pressure SHPB experimental system

经过以上改进, 该流固耦合 SHPB 加载实验系统可实现可控孔压、渗透压的预加载, 步骤如下:

(1) 可控孔压-围压动态加载实验。将试样和入射杆、透射杆端部部分用热缩管密封, 并在入射杆、透射杆上增加密封圈以防止液压油进入, 如图 6(a) 所示。轴围压加载稳定一段时间后, 可对试样加注孔隙水压。孔压加注过程中的水压推杆行程形成如图 6(b) 所示, 整个过程分为 3 个阶段: 第 1 阶段, 水压和推杆行程均阶梯上升; 第 2 阶段, 水压加载至预值且保持稳定, 岩石孔隙水压逐渐增大, 推杆仍缓慢推进; 第 3 阶段, 推杆行程趋于稳定, 岩石内部孔隙水压达到预值。此后可开展动态测试。

(2) 可控渗透压-围压 SHPB 实验系统。实验时, 试样密封过程与孔压-围压耦合实验一致, 如图 7(a) 所示。待轴围压稳定后导杆侧加注水压。水压加注过程和伺服水压加载系统的推杆行程如图 7(b) 所示。水压加注和渗流过程也可划分为 3 个阶段: 第 1 阶段, 水压阶梯式加注, 水压机的推杆行程也呈阶梯式向前推进; 第 2 阶段, 水在试样内部不稳定渗流, 此时水压已加注至预定水压值, 推杆的推进速率变缓但不稳定; 第 3 阶段, 试样内部渗流稳定, 入射杆内排水通道有

水稳定流出, 水压机推杆的推进速率也保持稳定。此后可进行动态加载。

然而, 预加载孔压或渗透压的条件下, 岩石所处仍为相等的侧向应力状态, 并且入射杆、导杆的端面导水槽设计使得该装置只能对圆柱形试样进行同轴方向的冲击加载, 这在一定程度上限制了对岩石动力学响应的研究范围。

综上所述, 3 类 SHPB 实验装置均能在一定程度上定量研究孔隙水压-围压耦合作用下的岩石动力学响应。流固耦合 SHPB 加载实验系统还可实现可控渗透压加载下的深部岩石赋存状态模拟, 表 1 汇总了 3 类 SHPB 装置在研究此类问题时的优劣势。国内外众多学者利用上述装置进行了大量研究, 相应成果在下一节进行总结。

表 1 不同类型实验装置的特征

Table 1 Characteristics of different types of experimental devices

设备类型	模拟方法	优势	不足
传统分离式霍普金森压杆	不同试样含水率	操作简便, 技术成熟	单轴应力状态、孔隙压力不确定
常规三轴围压 SHPB 系统	不同试样含水率/注水围压	三向加载, 可控围压	围压不恒定、孔隙压力不确定
真三轴围压 SHPB 系统	不同试样含水率	真三向围压, 可模拟复杂的应力状态	围压不恒定, 裂缝发展、孔隙水流具有一定的方向性
流固耦合 SHPB 加载实验系统	可控孔隙压力/渗透压力	孔隙水压和渗透压的定量表征	单向加载, 试样形状要求严格

2 流固耦合作用下岩石的动态力学响应

埋藏于地下深部的岩石一直受到地应力的作用, 经过开挖后, 其所处的应力状态亦会发生变化。根据距离临空面的距离, 前人将岩石所处的地应力状态分为远场的静水压区、中场的三轴应力区和近场的单轴应力区等^[27, 56]。高压水或者气体等流体广泛存在于地下岩体的孔隙或裂隙之中, 孔隙压力的存在影响着岩体的变形和断裂特性。因此研究不同应力状态、不同孔隙压力作用下的岩石动力学性质, 对于深部岩石工程具有积极的指导作用。本节将对按照深部岩石所处的不同应力状态以及孔隙水压(渗透压)的施加方式, 对流固耦合作用下岩石的动力学响应进行总结。

2.1 单轴加载下含水岩石的动力学响应

单轴加载使用传统 SHPB 或增加轴压加载系统的 SHPB 进行, 试样虽与空气连通, 但高应变率下孔隙水难以消散, 试样内部仍可能有孔隙水压的产生。因此单轴加载下含水岩石的动力学响应问题仍可归为流固耦合问题。下面对含水岩石动力学响应的实验研究结果进行介绍。

岩石的动态压缩强度可以表征岩石材料承受压缩应力的能力, 是爆破等工程设计中的关键参数之一。影响岩石动态压缩力学特性的因素涉及加载率^[48, 69-70]、孔隙结构^[71-72]、温度^[73-74]、含水率^[75-76]等, 其中含水率因素因作用机理复杂、影响效果显著而长期受到研究者的关注。国内外学者对单轴加载下受含水率影响的岩石动态力学性能进行了较系统的研究, 早在 20 世纪 60 年代, PODIO 等^[77]对格林河页岩在干燥和水

饱和条件下的动态弹性特性进行研究, 发现水的饱和度增加了压缩波速度, 降低了剪切波速度, 且对剪切波速度的影响更明显。随着 SHPB 成为动态加载的常用设备, 王斌等^[38]较早开展了饱和状态下的岩石动力学特性研究, 其使用 75 mm 直径的 SHPB 对自然风干和饱水状态下的砂岩试样进行了 20~80 s⁻¹ 应变率下的动态冲击试验, 结果表明该应变率范围内饱水砂岩动态强度与风干砂岩接近, 这与准静态下饱水砂岩强度降低的结果相反, 此后还根据翼型裂纹滑动模型^[78], 从细观角度推导了水岩耦合作用下的动态抗压强度计算公式。袁璞等^[40]对多种含水状态下的煤矿砂岩含水状态进行了应变率 200 s⁻¹ 以下的动态冲击实验, 结果表明含水率越大, 试样的动态抗压强度越高。相反的是, 王浩宇等^[79-80]对干燥、自然、吸水和饱水 4 种含水率的红砂岩试样进行了不同脉冲等级的冲击载荷下, 结果表明试样的动态抗压强度随含水率的增加而减小, 只有在高脉冲等级的饱和试样才出现了强度的上升。此后为进一步探究流固耦合的作用机理, KIM 等^[81-83]对干燥和饱和状态砂岩在动静荷载下的力学性能展开了研究, 结果表明, 2 种饱水状态砂岩的抗压强度和抗拉强度均随加载速率的增加而增大, 干燥试样的静态、快速和动态强度均高于饱和试样, 饱水砂岩的强度平均降低约 20%, 并且砂岩的体积密度和孔隙率与静态抗压强度和抗拉强度相关。为了厘清水效应和加载速率对动态岩石力学的作用机理, ZHOU 等^[84-85]先后以含水率和应变率为变量研究了砂岩的动态压缩性能。结果显示, 干燥和饱水状态砂岩的压缩特性均表现出明显的率效应, 较低应变率下饱和砂岩的压缩强度低于干燥砂岩, 但在孔隙压

力、Stefan 效应、黏滞效应等多效应共同作用下, 饱水砂岩的压缩强度具有更高的率敏感性, 其随应变率的增长速度更快并在 180 s^{-1} 左右时超过干燥砂岩。PETROV 等^[86-87]对干燥和饱和石灰石进行了 $100 \sim 500 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的动态压缩测试, 结果表明含水石灰岩的动态压缩强度始终低于干燥石灰岩。MA 等^[88]探究了珊瑚岩在不同应变速率和水饱和度下的动态力学性能, 结果表明水在一定程度上会削弱珊瑚岩的强度, 并且饱和珊瑚岩具有更高的率效应, 但珊瑚岩自身的结构缺陷仍是影响其力学性能的关键。王浩宇等^[89]对干燥、自然和饱水红砂岩进行了更高应变率下 ($200 \sim 350 \text{ s}^{-1}$) 的动态单轴冲击实验, 类似地也得到了抗压强度随含水率升高而降低、随应变率增大而增大, 以及饱水试样的率效应更为显著等结果。部分实验结果统计如图 8 所示, 对比可知水对不同岩石的作用并不相同, 不同状态的岩石的率效应也有所差别。

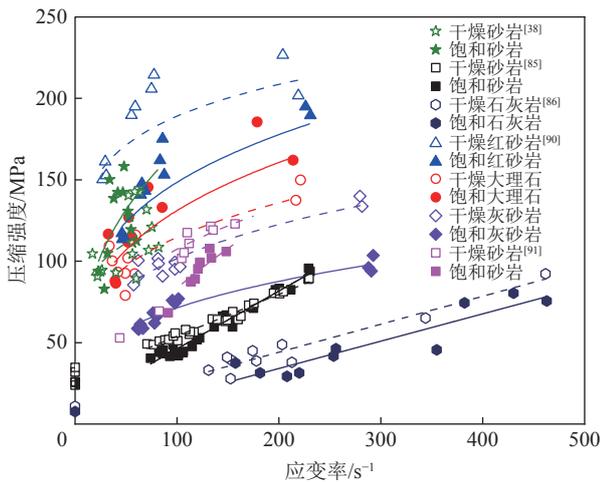


图 8 不同岩石动态压缩强度随加载率的变化规律^[38, 85-86, 90-91]

Fig. 8 Variations of compressive strength of rocks with loading rate^[38, 85-86, 90-91]

除强度指标外, 大量学者在流固耦合的问题上进行了更为细致的分析。如褚夫蛟等^[92]对 $0.1 \sim 70 \text{ s}^{-1}$ 应变率下不同含水状态砂岩的应力应变曲线进行分析发现, 干燥砂岩与含水砂岩的动态压缩应力应变曲线在卸载阶段有明显的不同。郑广辉等^[41, 93]则对更大应变率范围 ($180 \sim 400 \text{ s}^{-1}$) 内含水红砂岩的峰值应变、弹性模量、可释放弹性应变能进行分析, 表明其均具有应变率效应。XING 等^[94]借助 SEM(Scanning Electron Microscope) 手段对 CO_2 饱和的干燥与水饱和试样进行了微观颗粒物质分析, 如图 9 所示, 水或盐水的存在会加速矿物腐蚀和溶解, 二氧化碳饱和(在干燥和水饱和试样中)导致的矿物腐蚀、溶解和再

沉淀破坏了晶粒间的结合和摩擦, 降低了石英晶粒的完整性。王光勇等^[39]结合 DIC(Digital Image Correlation) 技术分析了干燥和饱水细砂岩动态压缩时的破坏机制, 发现饱水状态下的应变梯度更为显著, 而干燥状态下则有更多应变集中现象。CAI 等^[91, 95]模拟真实地应力环境, 在预应力下展开了干燥和饱和砂岩的动态压缩测试, 结果表明在给定的应变率条件下, 水会降低岩石的动态强度, 但是该削弱作用会随预应力增加而减弱, 同时预应力条件下的破坏模式以岩爆和碎块化为主, 无预应力条件下则以轴向劈裂为主。GU 等^[96]探究了不同孔隙率对饱和砂岩动态力学性质的影响, 结论表明孔隙度对饱水砂岩的影响是通过孔隙水压力和含水裂缝的 Stefan 效应的综合作用来实现的, 这 2 种效应受孔隙度的影响。当孔隙率较大时, 水饱和砂岩的动强度和弹性模量的降低主要归因于孔隙水压力。当孔隙率逐渐降低时, 裂缝扩展过程中 Stefan 效应起到的作用会逐渐增强, 甚至主导裂缝扩展。金解放等^[97]从破碎分形维数和能量耗散角度出发, 对不同冲击速度和含水率的红砂岩压缩测试结果进行经验拟合, 指出同一冲击速度下, 红砂岩的能量反射率随含水率增加而上升, 能量透射率随含水率的增加而呈指数下降, 能量耗散率与含水率具有二次函数关系; 同一含水率下, 能量透射率随着冲击速度的增大而减小; 能量耗散率则相反。试样的破碎分形维数随着含水率的增大而增大并趋于稳定, 具有指数函数关系, 破碎形态如图 10 所示(图中, ω 为含水率, %)。谭昊等^[90]对灰砂岩、红砂岩和大理岩进行了烘干、天然含水和自由吸水状态下的不同应变率动态冲击实验, 结果表明在含水状态下, 两种砂岩的动态抗压强度较烘干时均出现下降, 且较为坚硬的红砂岩强度下降效果更为显著, 而干燥状态下强度最低的大理岩则相反。MAN 等^[98]对房山花岗岩的饱水动态压缩特性进行了探究, 结果表明在 $10 \sim 90 \text{ s}^{-1}$ 应变率下, 水饱和和花岗岩强度高于自然状态花岗岩, 与前述砂岩的结果相反, 并从流体的 Bernoulli 效应、自由水的黏滞效应和流体的 Stefan 效应角度解释了该现象。CHU 等^[99]对干燥、半饱和和全饱和砂岩分别进行了 5 次恒定入射能循环冲击, 结果表明在每次冲击中随着含水率增加, 砂岩的承载能力均出现下降趋势, 同样说明了水对岩石的弱化作用。CHEN 等^[100]提出了一种新的方法来量化水岩耦合作用下的穿晶断裂和晶间断裂, 研究发现, 随着撞击速度的增加, 穿晶断裂占主导地位, 晶间断裂占次要地位。水的存在也会导致岩石微破裂机制的变化。此外, 毛细力、表面张力和化学反应也是导致岩石强度被水削弱的同样重要的因素。LI

等^[101]通过对砂岩进行 0~15 次的干湿循环改变了岩石孔隙度, 结果表明小孔隙度下水增强了砂岩的强度,

此时 Stefan 增强效应占主导; 随着孔隙度的增加, 水会削减砂岩强度, 此时孔隙水压力作用占主导。

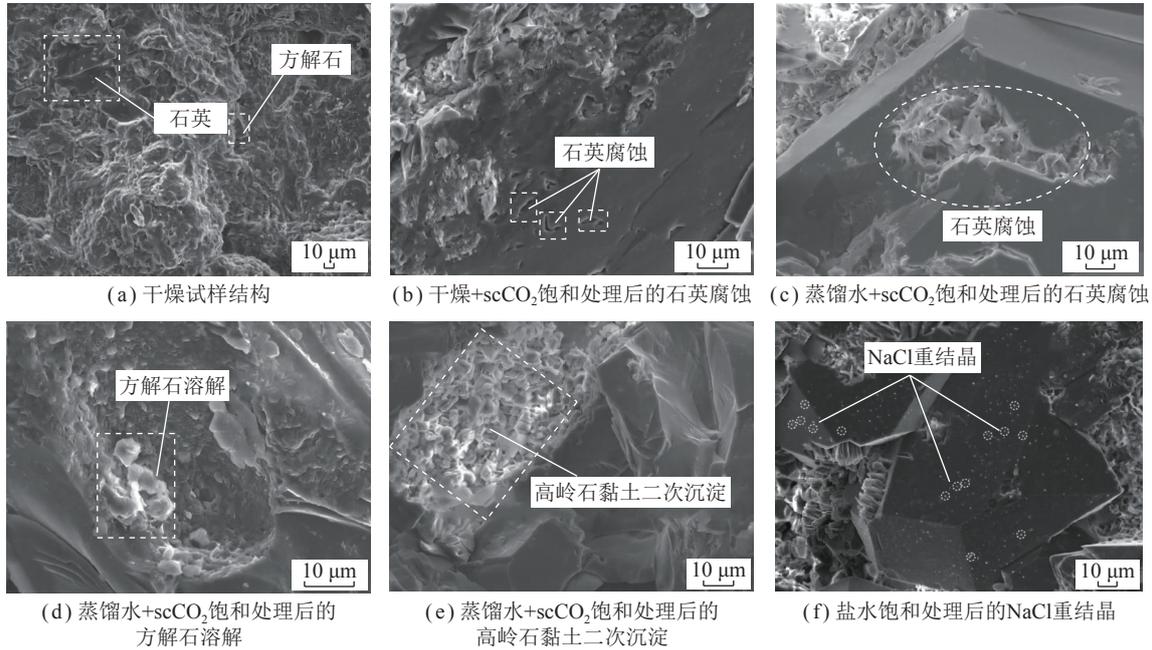


图 9 借助 SEM 观察到的砂岩试样微观结构^[94]

Fig.9 Typical SEM images of specimen microstructure^[94]

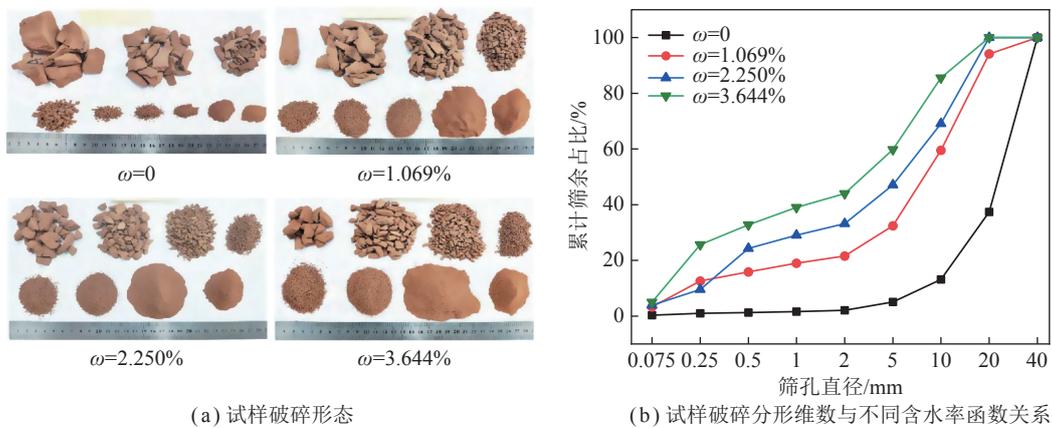


图 10 不同含水率红砂岩试样的破坏程度与筛分结果^[97]

Fig.10 Degree of destruction and sieving results of red sandstone specimens with different water contents^[97]

上述研究多集中于砂岩、大理岩和花岗岩, 学者在大应变率范围内对水岩耦合作用进行了探索, 对水岩耦合作用的细观和宏观表现做出了解释。此外, 在矿山开采过程中, 由于深部地下空间的岩爆、涌水和瓦斯突出等问题, 也有学者针对煤样进行了动态加载实验。如翟新献等^[43]对不同含水率煤样进行了单轴动态冲击实验, 得到了动静载状态下的不同含水率煤样的动态力学响应特征。GU 等^[102]研究了颗粒级配对水饱和软煤动态力学性能的影响, 结果表明, 颗粒级配显著影响水饱和试样的静态和动态力学性能, 这是通过中值直径 d_{50} 和不均匀系数的共同作用实现的。

王文等^[103-105]也对煤样开展了预应力状态下的动态压缩加载实验, 其结果表明煤样动静组合加载强度比静载整体提高 10%~30%, 不同于饱和砂岩比其静态下强度提高 2 倍的现象, 表明流固耦合作用与岩石的孔裂隙结构有显著关系。

2.2 三轴围压下含水岩石的动力学响应

对处于非临空面且应力状态复杂的深部岩石, 上述研究结果并不足以描述其动力学特性。因此, 众多学者进行了围压条件下含水岩石类材料的动态力学响应研究。以下分别对常规三轴和真三轴围压条件下流固耦合作用的研究结果进行总结。

2.2.1 常规三轴围压下含水岩石的动态测试结果

使用常规三轴围压 SHPB 装置对含水岩样进行动态加载, 需要考虑围压、含水率、应变率 3 个因素的影响。早期学者研制了一套岩石动静参数同步测试的实验装置, 该装置以稳定液压源施加孔隙压力, 以岩样轴向两端面的超声波换能器测定纵横波在岩样中的传播速度, 换算后得到动态弹性模量和泊松比^[106]。使用该装置对饱和砂岩试样进行不同孔隙水压 (0、2、4、6 和 8 MPa) 和围压 (0~30 MPa) 的加载测试, 定义平均应力与孔隙水压的差值为平均有效应力, 发现岩石的波速与动态弹性模量随平均有效应力的增加而增加并趋于稳定, 如图 11 所示。相比于干燥砂岩, 饱和水和孔隙压力的存在使得砂岩两个指标增大的趋势变缓, 在相同的应力条件下有孔隙压力时的动态杨氏模量值最大, 饱和时次之, 干燥时最小^[106]。

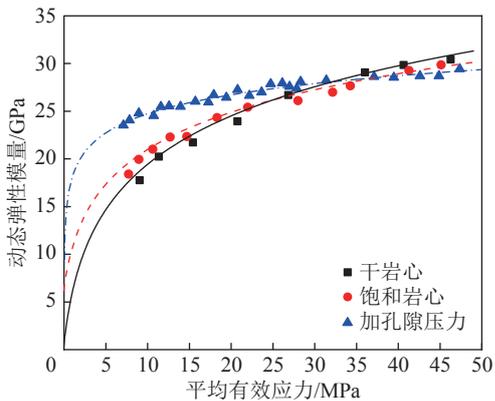


图 11 砂岩动态弹性模量随平均有效应力的变化^[106]

Fig.11 Variation of dynamic Young's modulus with mean effective stress for sandstone^[106]

近年来测试技术的进步使得岩石的动力学参数更容易获得。张军等^[107-108]对饱和、干燥等不同含水状态的砂岩试样进行了不同静水围压、不同应变率的动态压缩测试。在准静态的应变率范围 ($10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) 内, 砂岩强度和弹性模量都表现出明显的应变率效应、围压增强效应和含水弱化效应。并且围压的增大, 会减小水和应变率的影响; 含水率的增大, 则会加强围压硬化效应, 削弱应变率强化效应; 应变率的增大, 会削弱围压硬化效应, 加强含水弱化效应^[107]。陈灿灿^[109]研究了水岩耦合作用和应变率 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 范围内砂岩力学响应的变化规律, 实验结果同样表明, 砂岩强度和弹性模量随加载速率增长而上升, 随含水率增加而降低。

但当对试样施加动态荷载时, 含水率、应变率和围压的增加均会使砂岩的强度提高 (图 12)。3 者的相互作用也会发生改变, 具体表现为围压增大会使应变

率效应更加显著; 含水率增大, 提高了应变率强化效应, 弱化了围压硬化效应, 这与低应变率时相反^[110]。软岩常作为岩石工程稳定的关键因素, 针对软岩遇水的问题, ZHOU 等^[111]对不同饱和度的片岩进行了常规三轴的 SHPB 冲击实验, 结果表明饱水片岩相对于干燥状态具有较低的强度而表现出含水弱化效应 (图 13), 饱水试样具有较低的模量和更高的峰值应变, 因而展现出较好的延展性。应变率增强作用随含水率增加而更加显著, 但会受到围压作用的抑制。

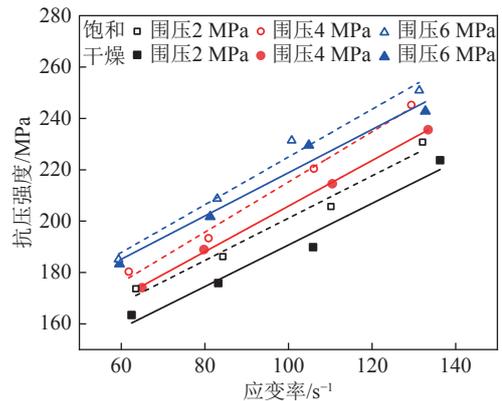


图 12 不同饱和度砂岩抗压强度随围压和应变率的变化^[110]

Fig.12 Variation of compressive strength with confining pressure and strain rate for sandstone with different degrees of saturation^[110]

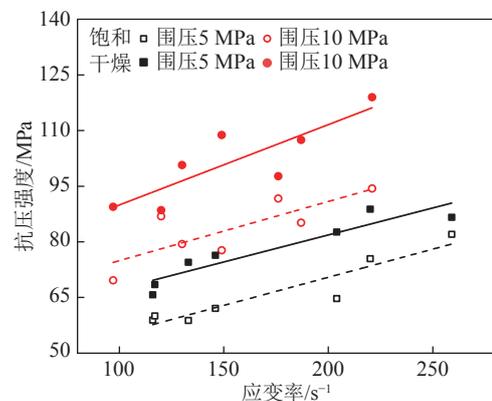


图 13 不同饱和度片岩抗压强度随围压和应变率的变化^[111]

Fig.13 Variation of compressive strength with confining pressure and strain rate for schist with different degrees of saturation^[111]

王文等^[66]对自然和饱和煤样进行三维动静组合加载, 研究了 4 MPa 和 8 MPa 等 2 种侧向围压和 6 种轴压 (8~36 MPa) 下煤的动态响应。由图 14 所示的实验结果表明, 侧向围压在加载过程中表现出较强的控制作用, 围压限制煤样侧向变形, 弹性阶段内煤样内部孔隙被压缩变小, 弹性阶段范围更大; 随着围压增大, 自然和饱水煤样的动态强度均有增大的趋势, 饱水煤样的强度更高且对围压的响应更强^[104]。轴压

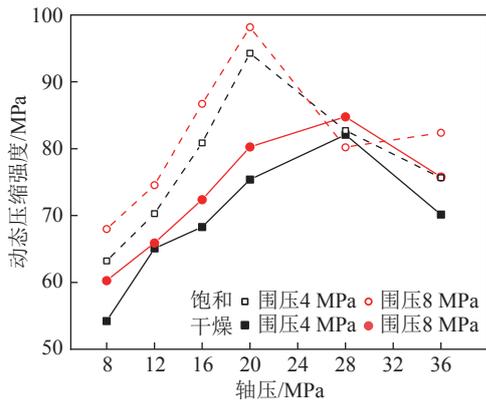


图 14 不同饱和度煤的动态抗压强度随轴围压的变化^[66]

Fig.14 Dynamic compressive strength of dry and saturated coal under different confining pressure and axial pressure^[66]

对煤动态强度的增强作用主要表现在弹性范围内,且当轴压大于煤静态强度的 55%(28 MPa)后,含水强化的作用不再明显。

另外,围压、含水率和应变率条件不但影响岩石的强度,也会使岩石的变形和破坏模式产生变化。三轴围压下,高轴压和冲击过程会催生岩石内部的裂纹,而围压会对裂纹的萌生和发展起到相反的抑制作用^[27,112-113]。如图 15 所示,围压的增加对岩石内部的微裂缝扩展起到抑制作用,岩石试件可能发生脆性向延性的转变,破坏形态将由拉伸破坏向压剪破坏逐渐过渡和发展^[111]。由于孔隙水对裂纹扩展的促进作用和高应变率下更多固体颗粒参与受力,相同围压下,试样的破碎程度随应变率和含水率提高而加剧^[104]。

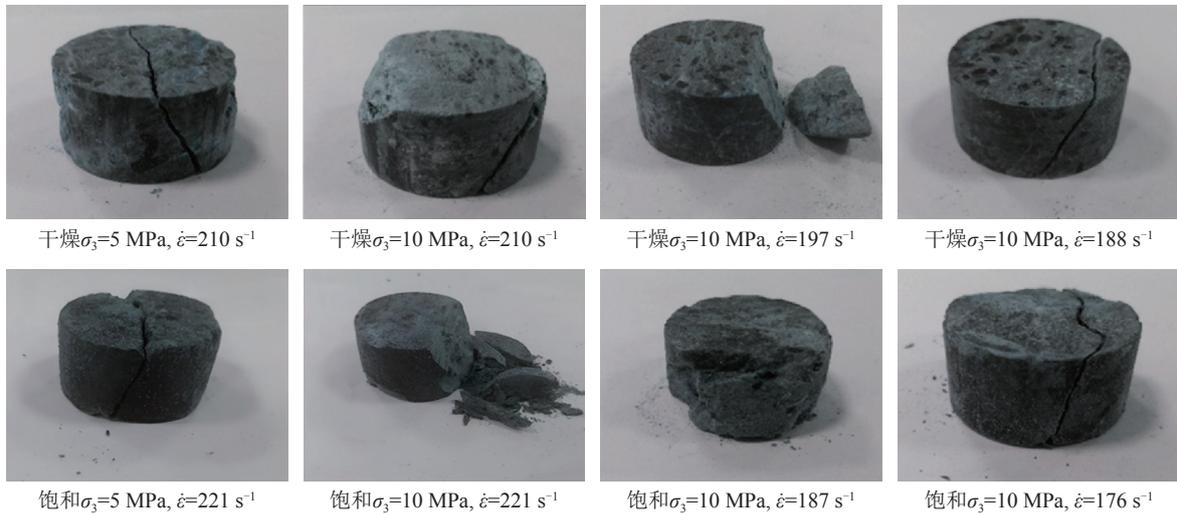


图 15 不同饱水状态和围压下片岩的破坏形态^[111]

Fig.15 Failure patterns of schist samples under different water-saturated states and confinement^[111]

2.2.2 真三轴围压下含水岩石的动态测试结果

为进一步探讨含水煤样在动静组合加载条件下的动力学特性,宋常胜等^[114-115]对自然和饱水煤样进行了真三轴围压下的动态加载试验。试验中固定 x 和 z 方向的静载围压分别为 8 和 6 MPa,通过改变 y 轴应力,模拟煤岩所处不同的深部地应力条件。结果表明,不同含水状态下的试样加载方向 (x 方向) 的动态强度均呈现出先增后减的趋势,转折点出现在 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时 (图 16),试样强度表现出对于静水压力状态的趋向性。在固定的三向围压状态下,饱水煤样在 x 方向的强度低于自然煤样,表现出加载方向强度的含水弱化性,这与常规三轴试验的结论相反^[66,104]。但在与加载方向垂直的 y 、 z 方向饱水煤样呈现出更高的峰值应力,且 3 个方向饱水煤样均具有较大的峰值应变^[115]。

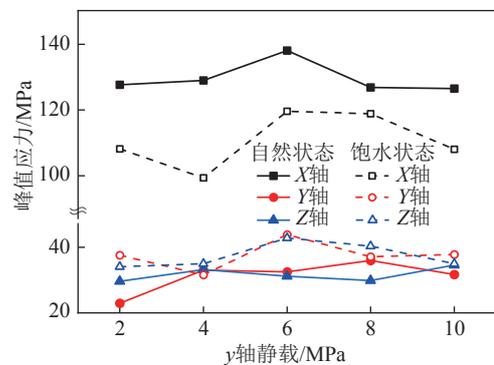


图 16 自然、饱水状态煤样各方向的动态峰值应力随 y 轴静载的变化^[115]

Fig.16 Variation of dynamic peak stress with y -axis prestress in each direction for natural and saturated coal^[115]

通过对动态加载过程中的能量传递进行分析,发现煤样在饱水处理后的弹塑特性发生变化,预静载下

更容易储存静载能量^[103]。相同的加载条件下, 饱水煤样具有更高的能量反射率和更低的能量吸收率, 相比之下自然煤样具有更高的能耗密度, 但自然煤样却表现出较低的破坏程度, 这说明孔隙水压促进了岩石内部裂隙的发育^[114]。另外煤样的破坏形态在不同的三

向围压状态下也有所不同, 当静载应力差较大时, 煤样内部裂隙发育, 结构出现大量损伤而丧失完整性, 试样更多出现拉伸破坏; 当围压应力差较小时, 煤样的结构破坏以剪切断裂为主, 剪切断裂面与冲击方向呈复杂的角度变化(图 17)。

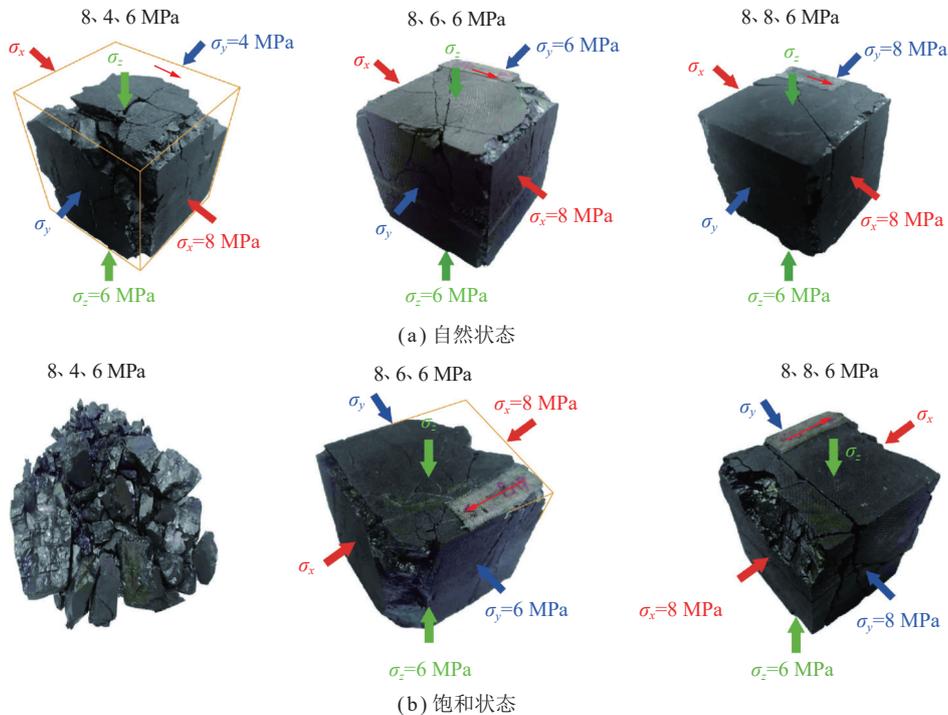


图 17 煤样在试验后的破坏形态^[114]

Fig.17 Failure mode of coal samples^[114]

2.3 流固耦合作用下的岩石动力学响应

以上对于三向应力水岩耦合作用下岩石动力学特性的研究中, 大多只考虑了含水率的影响而没有对孔隙压力进行定量的表征, 真三轴围压 SHPB 实验系统虽能模拟复杂的地应力状态, 但加载过程中试样不完全密封造成孔隙水流动和裂缝发展具有方向性, 最终呈现与常规三轴围压下相反的含水弱化现象。因此面对深部赋存“三高一扰动”的环境, 对于三向应力状态下可控孔压、可控渗透压加载下的岩石动力学相应研究是十分必要的。下面对主动孔压耦合作用和渗透压耦合作用下岩石动力学响应的研究结果进行介绍。

2.3.1 孔压耦合作用下岩石的动态力学特性

ZHAO 等^[46]使用天津大学自主研发的流固耦合 SHPB 加载实验系统对砂岩进行了不同静水压力 (5、10、15 MPa) 和孔隙压力的动态加载实验, 在保证孔隙水压小于静水围压的前提下分别设置了 1 和 2 MPa 的孔隙水压变化速率, 并根据加载气压和实际加载率划分了低 (约 1 000 GPa/s)、中 (约 1 700 GPa/s)、高 (约 3 100 GPa/s) 3 种加载率水平。实验结果表明, 砂岩的动态抗压强度受到围压、加载速率和孔隙水

压 3 者的影响, 总体表现出明显的应变率效应和围压增强效应, 即随围压和加载率的增加而提高。

图 18 给出了以应变率表征率效应的测试结果。保持围压和应变率一致, 对比分析发现动态强度随孔隙水压的增大而近似线性减小, 即孔隙水压对动态强度具有显著的弱化效应。根据有效应力理论, 由于孔隙水压的存在, 试样所受的围压约束减小, 试样更容易发生轴向变形; 另外孔隙水压促进了试样内部裂纹的扩展, 增大了试样的损伤程度。

以动态压缩强度为指标, 衡量围压、应变率和孔隙压力的耦合作用。采用最小二乘法线性拟合动态强度与孔隙水压的关系(图 18), 形式为

$$\sigma_{cd} = \sigma_{cd}^0 + kP_w \quad (10)$$

式中, σ_{cd} 为试样的动态强度; σ_{cd}^0 为孔隙水压为 0 时的试样动态强度; P_w 为孔隙水压; k 为衰减系数, 以表征孔隙水压对动态强度的衰减程度。

保持孔隙水压一致, 对比分析围压和应变率对动态强度的影响规律, 以孔隙水压为 0 为例, 对应各工况下的动态强度如图 19(a) 所示。从图 19(a) 可以看

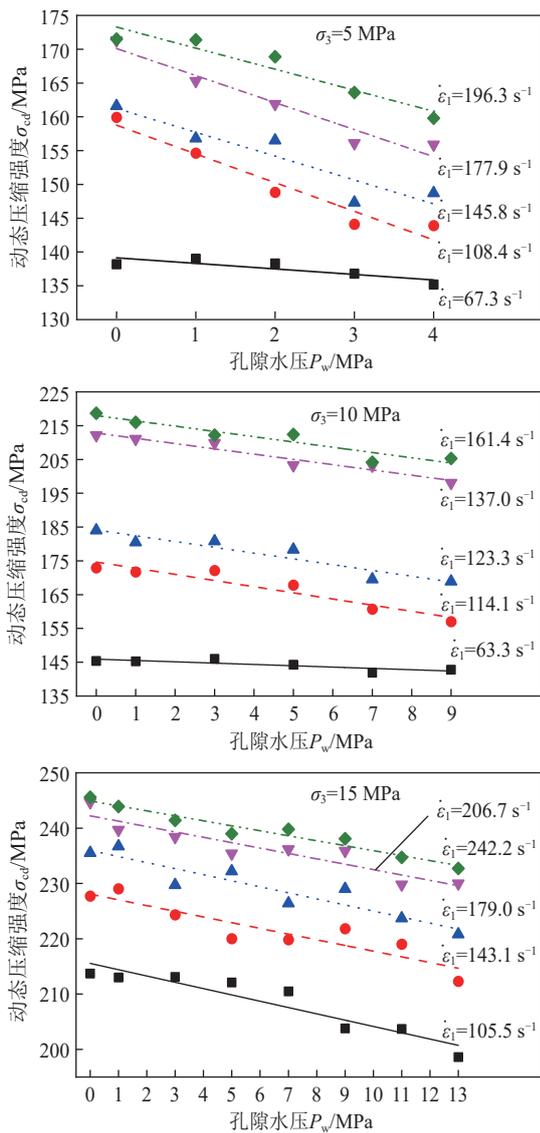
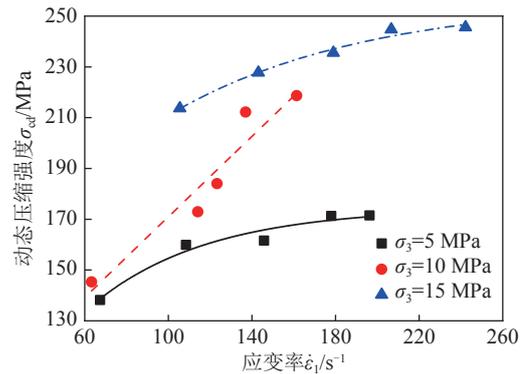


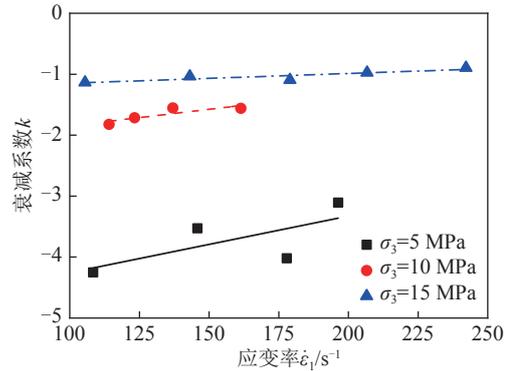
图 18 孔压-围压耦合作用下砂岩试样的动态压缩强度
Fig.18 Dynamic compressive strength of sandstone specimens under coupled pore-confining pressure

出,在相同围压下,动态强度随着应变率的增大而增大,动态强度表现出显著的率相关性。此外,随着围压的增加,动态强度的拟合曲线向上移动,动态强度随着围压的增加而增加,表现出显著的围压增强效应。衰减系数全部为负数(图 19(b)),表明孔隙水压对动态强度具有显著的衰减作用,衰减系数越小,衰减效应越明显。但是其衰减效应与围压和应变率密切相关。当围压一定时,衰减系数随应变率的增大而增大,具有显著的率相关性;当应变率一定时,衰减系数随围压的增加而增加,表明应变率的增大和静水围压的增大均会削弱孔隙水压对动态强度的衰减作用。

除强度特征外,ZHAO 等^[46]还对砂岩的变形破坏特征进行了分析,对比发现当应变率较低时,试样的峰值应变随应变率的增大而增大,峰值应变表现出显



(a) 围压和应变率对砂岩动态强度的影响



(b) 围压和应变率对动态强度衰减系数的影响

图 19 围压和应变率对砂岩和动态强度及衰减系数的影响
Fig.19 Effects of confining pressure and strain rate on the dynamic strength and attenuation coefficient of sandstone

著的率相关性,然而应变率较大时,峰值应变陡然减低,即在较高应变率作用下,试样的脆性增加,在较低的轴向应变下即发生破坏。如图 20 所示,峰值应变在试验所采用的围压和应变率范围内的变化范围为 0.006~0.017,该范围内峰值应变随孔隙水压增加并没有规律性的变化,因此围压和孔隙水压对峰值应变无显著的影响,这与 GONG 等^[116]的结论一致。实验后的对破坏的岩石试样进行回收发现,试样的破坏模式除了受与围压 SHPB 实验中相同的围压、应变率影响外,孔隙水压的增加使得砂岩出现由剪切破坏向剪切-拉伸混合破坏模式的转变,无孔压的试样主裂纹为倾斜于轴线的剪切裂纹,孔压加载后试样呈现出 X 型的共轭剪切裂纹和与轴向垂直的拉伸裂纹(图 21)。

2.3.2 渗透压耦合作用下岩石的动态力学特性

笔者使用天津大学研发的渗透压耦合 SHPB 加载测试系统对砂岩试样进行不同静水围压和渗透压下的冲击试验,通过控制荷载施加条件,保证静水围压相同的情况下单次冲击的入射能相等,不同渗透水压下试样均可破坏。

实验结果表明,由于围压对于裂纹发展的抑制作用,静水围压的增加会使岩石的抗冲击能力提高,相

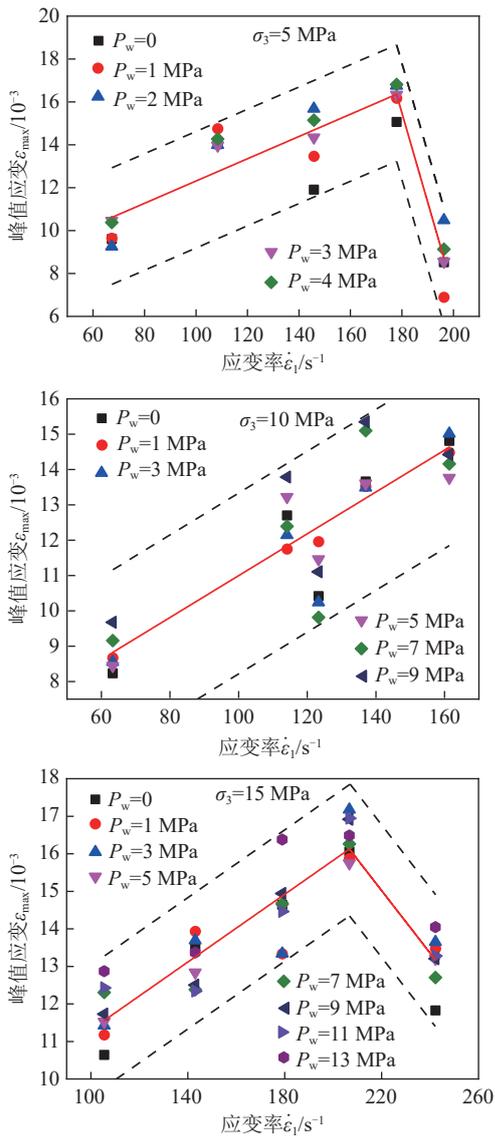


图 20 孔压-围压耦合作用下砂岩试样的峰值应变
Fig.20 Peak strain of sandstone specimens under coupled pore-confining pressure

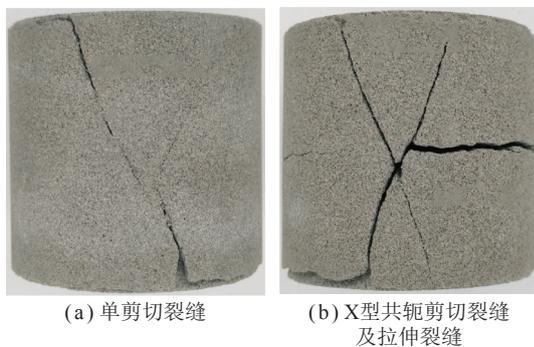


图 21 孔压加载前后砂岩试样典型的破坏形态^[46]

Fig.21 Typical damage patterns of sandstone specimens before and after pore pressure loading^[46]

同的渗透压力下, 砂岩表现出更高的强度。相反, 渗透压的施加会使岩石内部产生一定的损伤, 相同的静

水围压下, 砂岩的动态抗压强度随渗透压的增加而近似线性的下降。如图 22 所示, 在笔者选取的静水围压和渗透压范围及加载工况下, 围压增强效应强于渗透压弱化效应, 但渗透压的增加会削弱围压的增强效应。

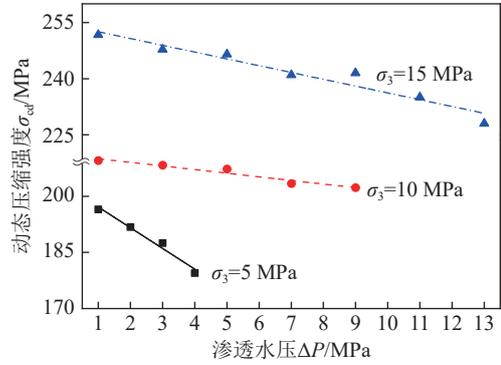


图 22 不同围压与渗透压下砂岩的动态抗压强度

Fig.22 Dynamic compressive strength of sandstone under different confining and osmotic pressure

另外对不同流固耦合条件下的砂岩动态峰值应变进行了统计如图 23 所示。同样静水围压和冲击能量的增加会使岩石的峰值应变有增加的趋势, 这一方面归结于静水围压对于试样内部裂纹的限制作用, 主裂纹贯通且试样破坏之前, 试样的轴向变形更大; 另一方面, 为保证试样受到单次冲击即发生破坏, 冲击能量随静水围压的增加而增大, 这主要依靠提高撞击杆的速度来实现, 因此撞击速度的提升导致加载率的提高, 岩石的峰值应变表现出一定的率效应。不同静水围压条件下, 峰值应变随渗透水压的增加并没有表现出一致的规律性, 且笔者中砂岩试样的峰值应变范围为 0.012~0.017, 包含于上一小节孔压耦合实验中砂岩的峰值应变范围与 GONG 等^[116]的研究中的范围内, 因此渗透水压对于流固耦合条件下的砂岩峰值应变并没有显著影响。

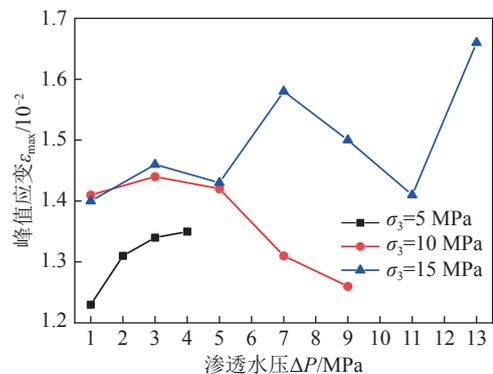


图 23 不同围压与渗透压下砂岩的动态峰值应变

Fig.23 Peak strain of sandstone under different confining and osmotic pressure

笔者另对破坏的砂岩试样回收并进行 CT(Com-

puted Tomography) 扫描, 对 15 MPa 静水围压及不同渗透压加载下的试样内部裂纹重建结果如图 24 所示。分析可知试样的宏观主裂纹环绕试样底部边缘且沿着与加载方向成一定的角度发育, 裂纹大体构型为 2 个上下分布且锥体尖端相互接触的圆锥体, 随渗透压的增大, 试样的圆锥形裂纹轮廓越来越清晰和完整,

最终形成了相互贯通的宏观裂纹。这表明渗透压有助于裂纹的扩展发育。选取平行试样轴向的任意截面观察, 裂纹均呈现为共轭 X 型裂纹形态, 中部贯以一条明显的与试样轴向垂直的拉伸裂纹, 表明渗透压耦合加载下试样的破坏模式为剪切-拉伸复合破坏, 这与孔压耦合作用下的破坏机制类似。

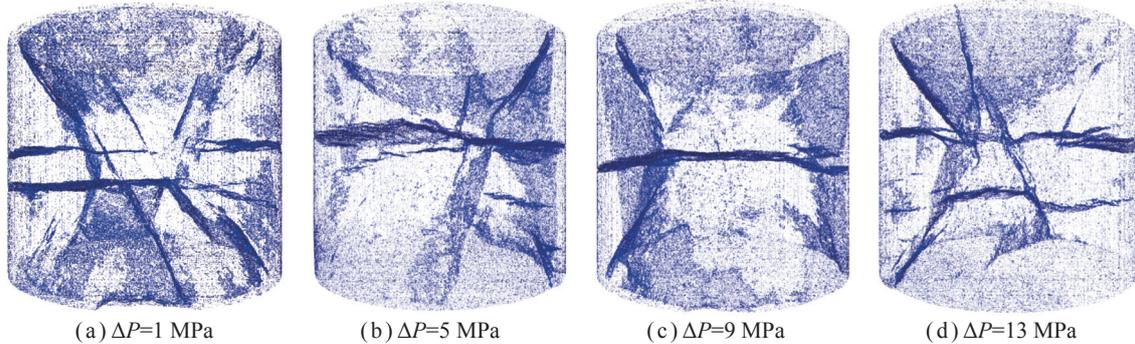


图 24 不同渗透压加载下试样的典型破坏形态

Fig. 24 Typical damage patterns of specimens under different osmotic pressure loading

以往的研究中也有学者对渗透压耦合下的岩石力学性质进行的探索。陈灿灿^[109]对准静态范围内不同应变率和渗透压耦合作用下的砂岩力学响应进行了研究。发现应变率和渗透水压的提高均会使试样表面出现局部应变集中的应力状态提前, 局部化变形带的宽度更大且伴有次生裂纹的产生; 加载率的提高对砂岩的强度、弹性模量、峰值应变均有增强效应, 但随渗透水压的提高, 砂岩试样抵抗变形和破坏的能力都会降低。ZHOU 等^[117]通过实验和理论分析指出, 影响岩石内部裂缝尖端应力强度因子的主要因素是渗透压力、动载荷、静应力和裂角。渗透水压的存在加剧了分支裂缝的扩展, 最大主应力方向的动载荷增加了 I 型裂纹尖端应力强度因子, 裂纹萌生角度随动载荷的变化而变化, 总体表现出初始裂缝强度随围压的增大而增大、随渗透压力的增大而减小的特点。

以上流固耦合状态下, 渗透压均表现出对于岩石力学性质的弱化。邹宝平等^[118]对粉砂岩在热-水-力耦合作用下的动力学特性进行了研究, 其采用单次冲击破坏的加载模式, 指出轴压、围压、渗透水压每增加一个量级, 粉砂岩试样的峰值应力和峰值应变的量级均增加, 轴围压、渗透水压与峰值应力符合对数分布, 与峰值应变符合指数分布。随着轴围压的增大, 粉砂岩试样峰值应力增长, 延性特征增加, 表现出显著的应力状态效应; 随着渗透水压的增大, 峰值应力和峰值应变均逐渐升高。高温条件的加入使得水对粉砂岩的弱化机制被水的黏性抗力所抵消, 因而水表现出一定的力学增强效应^[119-120]。

另外面对深部工程中结构大变形和有害气体涌出的风险, 王登科等^[121]对不同冲击载荷作用下含气

砂岩的损伤特征和渗透性规律进行了研究。实验时控制静水围压为 3 MPa, 渗透气压在 1 MPa 左右。结果表明, 充气砂岩的峰值应力应变表现出明显的率相关性, 最终破坏形式以剪切破坏为主。对试样进行 CT 扫描结果显示, 冲击速度的递增使得砂岩内部的张拉裂隙数量不断增加, 新生裂隙相互连接导致含气砂岩破坏后的损伤程度和渗透性大幅增加。为进一步研究气压的影响, 上述学者通过 CT 扫描对孔隙压力对煤体微裂隙扩展的影响进行了定量分析, 结果表明孔隙压力的升高会导致煤体内部微裂隙的萌生和扩展愈加明显, 裂纹的发展是一个持续的过程, 固定气压下煤样内部裂隙体积和裂隙面积百分比增长速度逐渐减小并趋于稳定^[122]。

本节介绍了流固耦合作用下的岩石在单向受压以及三向围压下的动态力学响应测试结果, 讨论了围压以及水、孔隙压力对岩石动力学响应的影响规律, 可为相关研究的深入开展提供参考。

3 流固耦合作用下围压与水的作用机理

众多的研究表明高地应力和高渗透压下的岩体表现出与岩石材料本身具有较大差别的动态力学响应, 在不同的应力条件和流体作用的共同影响下岩石表现出强度、刚度的变化和变形、破坏模式的转化。因此了解围压条件和水力条件的作用机制, 对于深部工程开展的合理设计和一些灾害防治工作具有重要意义。本节将分别对围压即水的作用机制进行总结。

3.1 围压的作用机理

深部岩石动态力学性能测试中所施加的围压可

以分为轴向围压、静水围压和三轴围压。一般认为, 围压对岩石动力学性质产生影响的作用机理在于对试样内部的裂纹扩展产生抑制或促进, 具体的影响随围压的施加方式和大小而变化。

岩石处于轴向围压状态时, 加载方向与围压相同。试验时试样所受为预压静载与动载的叠加^[123]。当加载方式为动态压缩时, 静载的大小决定试样处于何种变形阶段(压密阶段、弹性阶段、塑性阶段等), 其内部的裂隙有对应水平的发展。众多学者研究表明, 仅当轴向围压处于试样的弹性极限以下时, 其增加对裂纹有递增的限制作用, 超过弹性极限, 试样内部裂纹发展, 试样迅速破坏^[124-125]。随轴向围压增加, 岩石动态强度表现出先增后降的趋势^[126]。当对试样进行巴西劈裂或类似方式间接测量试样的动态拉伸性能时, 岩石往往表现出脆性破坏。轴向围压的存在使得试样的部分区域受到预施加的张拉应力, 微裂纹开展, 从而削弱了岩石的动态抗拉能力^[26]。类似的, 当对直切槽半圆盘试样加载测试岩石的动态 I 型断裂韧度时, 预加轴向围压使裂缝尖端处同样产生预张拉应力, 较低的冲击能力即可使裂纹扩展, 从而降低试样的断裂韧度^[127]。

静水围压下, 试样受到各方向相等的压力限制作用, 岩石内部交错的裂纹网络受压并一定程度地闭合^[116, 128]。动态巴西劈裂试验或对半圆盘形状试样进行冲击加载时, 并不会产生预张拉应力导致岩石抗拉能力的劣化^[27, 129]。随着静水围压增大, 裂纹开展受到的抑制作用增强, 强度、韧度增加, 试样表现出更高的抗冲击性。在压缩试验中, 裂纹发展被限制使试样有更高的均匀性和完整性, 根据莫尔-库伦理论, 动态加载下试样内部率先达到抗剪极限的部位发生破坏, 表现出宏观的剪切破坏。

三向围压可以分为常规三向围压和三向不等围压两种应力状态。常规三轴围压可以看作是静水围压与轴向围压的耦合。三向不等围压则可看作是轴向围压、静水围压和侧向围压的耦合。由于静水围压岩石内部裂纹受到各方向均匀的限制作用, 因此三向围压状态下, 岩石的抗冲击性对于静水围压状态具有趋向性, 即当三向围压的应力差越小, 岩石动态强度越高, 破碎程度越低。

3.2 水岩作用机理

在水的耦合作用下, 部分岩石的力学性质低于干燥岩石的力学性质, 表明水对岩石的力学性质具有显著的劣化作用, 其中的主要作用机制总结如下^[130]:

(1) 水引起的表面能降低。固体表面的活性介质的吸附效应将会弱化固体的强度和抗变形能力^[131-132],

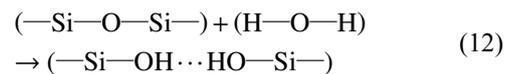
即“Rebinder 效应”。其发生机制是分子在“黏结驱动”的作用下与其周围的分子相互作用, 宏观上表现为吸附在由其他分子组成的物质表面。根据表面物理学, 当一种物质分子吸附在另一种物质的表面时, 会使后者的表面更容易发生位错和放电, 从而导致材料塑化, 屈服点和强度系数降低, 滑移包络线增多以及单晶体尺寸减小。这些微观尺度的结构变化, 在物理性质上表现为材料的表面能 γ 降低, 根据格里菲斯准则, 其破坏荷载 σ_r 也相应减小, 表现为宏观强度的减小, 如式(11)所示:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}} \quad (11)$$

式中, E 为材料的弹性模量; c 为材料内部的半微裂纹长度。

(2) 毛细张力降低。孔隙受压导致孔隙水流动, 裂缝被水填满导致毛细张力降低。

(3) 水与岩石矿物发生劣化反应。例如当石英矿物与水相遇时, 水将会与石英矿物发生化学反应, 将石英中较强的硅氧键替换成较弱的氢键, 从而弱化分子之间的相互作用, 宏观上表现为材料强度降低, 如式(12)所示^[133-134]。另外, 部分矿物与水反应会使得水中出现游离元素。有学者根据浸水时间不同所析出的元素浓度表征岩石颗粒界面胶结结构的损伤, 推导了水岩界面软化过程的表达式, 定量表征了软岩的含水软化力学特性^[135]。



(4) 水对滑移裂纹之间的润滑作用。水会填充岩石内部孔隙, 并被吸附在矿物晶体表面, 形成以整数个分子层排列的结构化水薄膜^[136], 又由于水与岩石中的石英矿物发生化学反应, 破坏了石英晶体中的硅氧键(Si—O), 在其表面产生电荷, 将吸附更多的水分子层, 增大结构化水薄膜的厚度^[137-138]。当岩石裂隙发生起裂扩展时, 裂隙中的剪切应力将集中在这些水薄膜中, 水薄膜越厚, 裂隙之间的摩擦因数越小, 承载的剪切应力则越小, 水薄膜的润滑作用促进了裂纹滑动开裂, 宏观上表现为岩石强度降低。

(5) 孔隙水压和水楔效应对裂纹的扩展作用。当孔隙水压增加时, 水压将作用在裂隙尖端, 增大裂隙尖端的应力强度因子, 从而促进裂纹起裂扩展^[117], 弱化岩石力学性质。之前的众多研究已表明, 在较高孔隙水压的作用下, 试样的主剪切裂纹附近会出现大量二次裂纹, 从而导致试样力学性质劣化。此外, 岩石试样中的孔隙水在 SHPB 动态冲击加载方式下产生

的水楔效应^[139]也会进一步促进裂纹开裂扩展,削弱岩石的力学性质。

根据第 3 节所述,动载作用下,水会对岩石的力学性质一般呈现出增强的效果,即水在高加载率下会大幅增强岩石的动态力学性能,且加载率越高,增强效果越显著。对于水的强化作用机制,可总结为如下几类:

(1) 饱和水引起的惯性效应增大^[130, 140]。岩石在动态加载作用下瞬间破裂,不可避免地会产生惯性效应,而惯性效应将阻碍裂纹的起裂扩展,从而增大岩石的宏观强度。另外由于泊松效应,入射压缩波传播至试样时,试样会发生轴向压缩和径向膨胀。但由于惯性效应存在,2 种变形并非同时发生,径向膨胀变形或径向围压卸荷由试样表面传播至试样中心,其传播速度相对压缩波较慢,因此,动态加载过程中试样的径向膨胀或卸荷被充分延迟,“径向约束”作用的存在对试样的动态强度具有显著的增强作用^[141-142]。会在试样加载过程中,经过理论推导,径向约束围压的最大值位于试样横截面中心,沿径向呈二次函数形式衰减,直至试样表面为 0,可由式 (13) 量化^[143]:

$$\sigma_r = \rho \frac{v(3-2\nu)}{8(1-\nu)} (a^2 - r_s^2) \frac{d^2 \varepsilon_z}{dt^2} \quad (13)$$

式中, σ_r 为径向约束围压; ρ 为试样的密度; ν 为试样的泊松比; a 为试样横截面上任意一点与其中心的距离; r_s 为试样的半径; ε_z 为试样轴向应变; $d^2 \varepsilon_z / dt^2$ 为试样轴向应变率加载速率。

由式 (13) 可以看出试样密度的增加和应变速率的增加都会增大惯性增强作用。

(2) 饱和水引起的局部损伤减小^[139]。试样水饱和或孔隙压力存在下,内部孔隙被水填满,水相比于空气有更高的波阻抗,在压缩波传播至水岩界面时会发生较少的反射,因而较少的反射拉伸波降低了局部的损伤,从而提高了岩石的宏观强度。另外,围压的施加会使试样内部微裂纹有闭合的趋势,孔隙被压缩或部分孔隙背水充盈,这使得围压促进了水的强化作用。

(3) 水的表面张力引起的弯液面效应。在动态冲击荷载的作用下,岩石试样中的裂纹扩展速度极快,孔隙中的水无法及时抵达裂纹尖端,在水的表面张力作用下,孔隙水会在裂纹中形成弯液面,并在裂纹尖端附近产生阻碍裂纹扩展的阻力^[38, 40, 98]。该效应所产生的阻力可由式 (14) 表示:

$$\sigma_m = \frac{2\gamma_w \cos \theta_E}{\rho_m} \quad (14)$$

式中, σ_m 为弯液面阻力; γ_w 为水的表面能; θ_E 为润湿角;

ρ_m 为弯液面的曲率半径。

(4) 水的黏滞性引起的 Stefan 效应^[144-145]。黏性液体 (例如水或油) 薄膜填充在两块相互平行的圆形平板之间,当两块平板沿垂直于平面方向以相对速度分离时,由于液体薄膜的黏滞性,黏性液体会沿着分离的反方向对平板施加黏滞阻力,从而阻碍或延缓平板分离^[38, 40]。试样受到动态冲击荷载的作用时,试样内的微裂纹表面将会快速分离,微裂纹迅速起裂扩展,同时,微裂纹中的水由于其黏滞性,会在微裂纹表面产生阻碍微裂纹分离的黏滞阻力 σ_μ , 从而在宏观上影响试样强度^[98]。Stefan 效应可由式 (15) 量化表示:

$$\sigma_\mu = \frac{3\mu_w r^2}{2h^3} \frac{dh}{dt} \quad (15)$$

式中, σ_μ 为液体施加在平板上的黏滞阻力; r 为假设圆形平板的半径; h 为平板的间距; μ_w 为液体的动力黏滞系数; dh/dt 为平板分离的相对速率。

(5) 牛顿内摩擦效应^[85]。类似于 Stefan 效应所述,当黏性液体薄膜填充于两块相对滑移的平行板之间时,忽略边界效应的影响,黏性液体亦会沿着滑移的反方向施加滑移黏滞阻力,从而阻碍或延缓平板的相对运动。在动态冲击荷载的作用下,微裂纹发生剪切滑移时会带动微裂纹中的水沿平行于裂纹表面方向产生滑移运动,由于水的黏滞性,会在裂纹面产生阻碍剪切滑移的剪切黏滞阻力,从而在宏观上影响试样强度。根据牛顿内摩擦定律,产生的滑移黏滞阻力可由式 (16) 量化表示:

$$\tau_\mu = \mu_w \frac{U}{h} = \mu_w \frac{du}{dy} \quad (16)$$

式中, τ_μ 为滑移黏滞阻力; U 为平板滑移速度; du/dy 为流速梯度。

(6) 孔隙水流动引起的 Bernoulli 效应^[98]。流体流动速度越大,其承受的压力就越小。裂缝越靠近尖端区域储水空间越小,液体流动速度越快,该区域相比于裂缝发育的区域的压力越小 ($P_2 < P_1$)。动态加载下,流体速度足够快时裂缝尖端的压力远小于裂缝面的平均压力,更多的压力被已发育的裂缝分担,因而对裂缝尖端的开展有一定的抑制作用。

水对岩石动力学性质均存在双重影响。水的作用机制在于水与岩石裂隙结构或表面结构的物理作用和与岩石矿物的化学反应,如图 25 所示。因此水最终对岩石动力学性质表现出的强化或者弱化效应受到岩石矿物成分、物理性质和加载条件等多方面的影响。

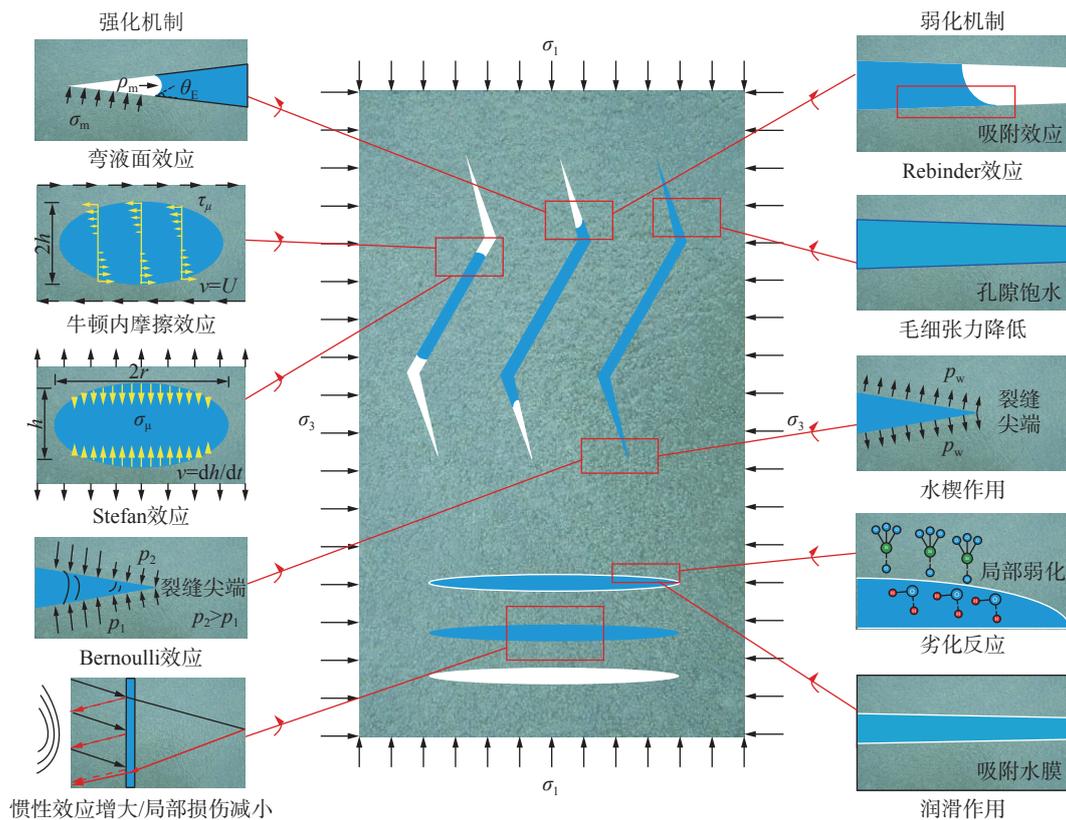


图 25 水的作用机理示意

Fig.25 Schematic of the mechanism of water

4 结论与展望

4.1 结论

(1) 传统分离式霍普金森压杆在研究含水率测试技术成熟, 分析方法完备。众多学者基于此对不同含水率下的岩石动力学响应进行了规律性的探索总结, 一般来说水对岩石动态抗压强度具有弱化效应, 但饱水岩石的动态强度往往具有更高的率敏感性, 甚至在较高应变率时, 饱水岩石的动态强度可能会反超干燥岩石, 表现出含水强化。因此水的作用受到岩石含水状态、应变速率等多种因素的影响。

(2) 围压 SHPB 测试系统可以模拟深地复杂的应力环境。常规三向围压状态下, 对于砂岩和煤等强度较高的岩石, 含水率、围压和应变率的增加均会是其表现出更高的强度, 但对于片岩类软岩, 则表现出含水弱化效应。真三轴围压状态下, 水的存在会弱化煤岩加载方向的强度而使其余两方向的峰值应力提高。围压的存在会使岩石的破坏模式向剪切破坏转变, 应变率和含水率的提高会加剧岩石的破坏程度。

(3) 流固耦合 SHPB 测试系统的发展应用, 分别实现了对深部赋存环境中高地应力和高渗透压的模拟。孔压-静水围压耦合作用下岩石的内部的裂纹受到围压的抑制而表现出明显的围压增强效应, 岩石强度和

应变均表现出应变率效应。孔隙水压会增加岩石的内部损伤, 岩石的动态抗压强度随孔隙水压的增加而下降, 但围压的增加会抑制孔隙水压的弱化作用。同时, 孔隙水压的增加使岩石的破坏模式由剪切破坏向剪切-拉伸破坏转变。渗透压-静水围压耦合状态下, 岩石同样表现出围压增强效应和应变率效应, 渗透水压的增加会使岩石的动态强度下降, 并削弱围压增强作用。渗透压耦合作用下岩石的破坏模式与孔压耦合下的破坏模式一致。

(4) 围压对于岩石动力学性质的作用受到其大小和方向的影响。轴向围压一定范围内会使动态抗压强度提高, 但在超过一定范围内会促进裂纹的发育, 导致动态抗压能力的下降。静水围压对岩石内部裂纹施加各向均匀的限制作用, 使得岩石的完整性和均匀性提高, 试样的破碎程度降低, 破坏模式发生转变, 表现出更高的抗冲击性, 三向围压是静水围压、轴向围压和侧向围压的耦合, 岩石的强度和抗冲击性能对于静水压力状态具有趋向性。

(5) 水对岩石的动力学性能具有双重作用。其强化作用机制可总结为: 水饱和引起的惯性效应增大; 水饱和引起的局部损伤减小; 水的表面张力引起的半月板效应; 水的黏滞性引起的 Stefan 效应和牛顿内摩

擦效应;孔隙水流动引起的 Bernoulli 效应。弱化作用机制可总结为:水引起的表面能降低;水饱和导致的毛细管张力降低;水与岩石矿物发生劣化反应;水对滑移裂纹之间的润滑作用;孔隙水压和水楔效应对裂纹的扩展作用等。水对岩石的整体作用效果受到岩石矿物成分、物理性质和加载条件的综合影响。

4.2 展 望

虽然使用以霍普金森压杆及其改进装置为主的实验设备对流固耦合作用下的深部岩石动力学响应进行了丰富的研究,但现有流固耦合作用下深部岩石力学的理论体系并不完善。深部“三高一扰动”赋存状态下的岩石力学响应鲜有涉及。因此,以下问题仍未解决,相关内容有待广大岩石力学和工程界学者进一步探索:

(1) 当前流固耦合作用下岩石动力学响应的实验研究,多集中于强度、宏观变形等特性,对于岩石内部孔隙及渗透特性演化的研究尚不充分,亟需结合声发射、CT 扫描等可能手段,进一步探究岩石内部的结构响应。

(2) 为更加深入描述流固耦合作用下岩石动力学响应特性,需要结合损伤力学、断裂力学、流体力学等相关内容完善流固耦合的相关理论,建立岩石材料的物理力学模型。

(3) 在上述问题的基础上,需要进一步考虑对高温场的引入,真实还原“三高一扰动”的多场耦合状态,从而对深部赋存条件下“原位”岩石力学性质进行研究。

参考文献(References):

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].*岩石力学与工程学报*,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究探索[J].*岩石力学与工程学报*,2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [3] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4): 1411-1478.
- [4] 陈文华,黄火林,马鹏.超高应力作用下锦屏二级水电站深部岩体变形特性试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2015,34(S2):3930-3935.
CHEN Wenhua, HUANG Huolin, MA Peng. Test study of deformation characteristics of deep rock mass in Jinping II hydropower station under ultra-high pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 3930-3935.
- [5] 冯夏庭,吴世勇,李邵军,等.中国锦屏地下实验室二期工程安全原位综合监测与分析[J].*岩石力学与工程学报*,2016,35(4):649-657.
FENG Xiating, WU Shiyong, LI Shaojun, et al. Comprehensive field monitoring of deep tunnels at Jinping underground laboratory(CJPL-II) in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(4): 649-657.
- [6] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].*煤炭学报*,2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [7] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].*力学进展*,2005(1):91-99.
ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under condition of high ground pressure in the depths[J]. *Advance in Mechanics*, 2005(1): 91-99.
- [8] 李利平,李术才,石少帅,等.基于应力-渗流-损伤耦合效应的断层活化突水机制研究[J].*岩石力学与工程学报*,2011,30(S1):3295-3304.
LI liping, LI Shucai, SHI Shaoshuai, et al. Water inrush mechanism study of fault activation induced by coupling effect of stress-seepage-damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S1): 3295-3304.
- [9] 夏开文,王帅,徐颖,等.深部岩石动力学实验研究进展[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(3):448-475.
XIA Kaiwen, WANG Shuai, XU Ying, et al. Advances in experimental studies for deep rock dynamics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(3): 448-475.
- [10] 夏开文,徐颖,陈荣.考虑深部赋存条件的岩石动态破坏试验研究进展[J].*隧道与地下工程灾害防治*,2019,1(1):58-75.
XIA Kaiwen, XU Ying, CHEN Rong. Dynamic tests of rocks subjected to simulated deep underground environments[J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2019, 1(1): 58-75.
- [11] 李根,唐春安,李连崇.水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展[J].*力学进展*,2012,42(5):593-619.
LI Gen, TANG Chunan, LI Lianchong. Advances in rock deformation and failure process under water-rock coupling[J]. *Advances in Mechanics*, 2012, 42(5): 593-619.
- [12] 张英,李鹏,郭奇峰,等.水力耦合裂隙岩体变形破坏机制研究进展[J].*哈尔滨工业大学学报*,2020,52(6):21-41.
ZHANG Ying, LI Peng, GUO Qifeng, et al. Research progress of deformation and failure mechanism in fractured rock mass under hydromechanical coupling[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(6): 21-41.
- [13] 张有天.从岩石水力学观点看几个重大工程事故[J].*水利学报*,2003(5):1-10.

- ZHANG Youtian, Analysis on several catastrophic failures of hydraulic projects in view of rock hydraulics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003(5): 1-10.
- [14] LONDE P. The malpasset dam failure[J]. *Engineering Geology*, 1987, 24(1-4): 295-329.
- [15] WITTKE W, LEONARDS G. Modified hypothesis for failure of Malpasset dam[J]. *Engineering Geology*, 1987, 24(1-4): 367-394.
- [16] 吴宗之, 梅国栋. 尾矿库事故统计分析及其成因研究[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(9): 70-76.
- WU Zongzhi, MEI Guodong. Statistical analysis of tailings pond accidents and cause analysis of dam failure[J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(9): 70-76.
- [17] 王云刚, 崔春阳, 张飞燕, 等. 2011—2020 年我国较大及以上煤矿事故统计分析及其研究[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(9): 3269-3276.
- WANG Yungang, CUI Chunyang, ZHANG Feiyan, et al. Statistical analysis and research on major and above coal mine accidents in China from 2011 to 2020[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(9): 3269-3276.
- [18] 孙振海, 韦建昌, 韩玉, 等. 隧道施工事故统计分析[J]. *西部交通科技*, 2020(7): 91-93.
- SUN Zhenhai, WEI Jianchang, HAN Yu, et al. Statistical analysis of tunnel construction accidents[J]. *Western China Communications Science and Technology*, 2020(7): 91-93.
- [19] 冯翼, 付支海, 马强. 油气田井下作业事故分析与防控措施探寻[J]. *中国石油石化*, 2017(5): 140-141.
- FENG Yi, FU Zhihai, MA Qiang. Analysis and exploration of preventive and control measures of oil and gas field downhole operation accidents[J]. *China Petrochem*, 2017(5): 140-141.
- [20] 刘见中, 孙海涛, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 258-267.
- LIU Jianzhong, SUN Haitao, LEI Yi, et al. Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 258-267.
- [21] 张永民, 邱爱慈, 周海滨, 等. 面向化石能源开发的电爆炸冲击波技术研究进展[J]. *高电压技术*, 2016, 42(4): 1009-1017.
- ZHANG Yongmin, QIU Aici, ZHOU Haibin, et al. Research progress in electrical explosion shockwave technology for developing fossil energy[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(4): 1009-1017.
- [22] 秦勇, 邱爱慈, 张永民. 高聚能重复强脉冲波煤储层增渗新技术试验与探索[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(6): 1-7, 70.
- QIN Yong, QIU Aici, ZHANG Yongmin. Experiment and discovery on permeability improved technology of coal reservoir based on repeated strong pulse waves of high energy accumulation[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(6): 1-7, 70.
- [23] 夏开文, 蔡英鹏, 徐颖, 等. 静水压下热损伤大岩动态拉伸特性研究[J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(11): 1136-1145.
- XIA Kaiwen, CAI Yingpeng, XU Ying, et al. Experimental study of dynamic tensile failure of thermally damaged Fangshan marble subjected to hydrostatic confinement[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2020, 53(11): 1136-1145.
- [24] 夏开文, 姚伟. 预加载下岩石的动态力学性能研究[J]. *工程爆破*, 2015, 21(6): 7-13.
- XIA Kaiwen, YAO Wei. Dynamic mechanical properties of rock under pre-load[J]. *Engineering Blasting*, 2015, 21(6): 7-13.
- [25] 徐颖, JUNCHEN Z, 姚伟, 等. 花岗岩动态断裂能各向异性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S1): 3231-3238.
- XU Ying, ZHANG Junchen, YAO Wei, et al. Experimental study of dynamic fracture energy anisotropy of granitic rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1): 3231-3238.
- [26] WU B B, CHEN R, XIA K W. Dynamic tensile failure of rocks under static pre-tension[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 12-18.
- [27] WU B B, YAO W, XIA K W. An experimental study of dynamic tensile failure of rocks subjected to hydrostatic confinement[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(10): 3855-3864.
- [28] XIA K, YAO W, WU B. Dynamic rock tensile strengths of Laurentian granite: Experimental observation and micromechanical model[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(1): 116-124.
- [29] XU Y, YAO W, XIA K, et al. Experimental study of the dynamic shear response of rocks using a modified punch shear method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(8): 2523-2534.
- [30] YAO W, HE T, XIA K. Dynamic mechanical behaviors of Fangshan marble[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(5): 807-817.
- [31] YAO W, XIA K, LI X. Non-local failure theory and two-parameter tensile strength model for semi-circular bending tests of granitic rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 110: 9-18.
- [32] YAO W, XIA K W. Dynamic notched semi-circle bend (NSCB) method for measuring fracture properties of rocks: Fundamentals and applications[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(5): 1066-1093.
- [33] 夏开文, 周传波. 岩石动态力学参数测试综述[J]. *工程爆破*, 2014, 20(2): 43-53.
- XIA Kaiwen, ZHOU Chuanbo. Review of testing methods for dynamic rock mechanical properties[J]. *Engineering Blasting*, 2014, 20(2): 43-53.
- [34] XIA K, YAO W. Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system - A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(1): 27-59.
- [35] LI X B, GONG F Q, TAO M, et al. Failure mechanism and coupled static-dynamic loading theory in deep hard rock mining: A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(4): 767-782.

- [36] XIE H P, LU J, LI C B, et al. Experimental study on the mechanical and failure behaviors of deep rock subjected to true triaxial stress: A review[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(5): 915–950.
- [37] 闻名, 陈震, 许金余, 等. 不同含水率红砂岩静态劈拉试验及微观分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(1): 86–92.
WEN Ming, CHEN Zhen, XU Jinyu, et al. Static-dynamic split tensile tests and micro analysis on red-sandstone with different moisture contents[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(1): 86–92.
- [38] 王斌, 李夕兵, 尹士兵, 等. 饱水砂岩动态强度的 SHPB 试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 1003–1009.
WANG Bin, LI Xibing, YIN Tubing, et al. Split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiments on dynamic strength of water-saturated sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 1003–1009.
- [39] 王光勇, 余锐, 马东方, 等. 饱水细砂岩动态抗拉与抗压强度试验对比研究[J]. *高压物理学报*, 2020, 34(4): 49–58.
WANG Guangyong, YU Rui, MA Dongfang, et al. Comparative study on dynamic tensile and compressive strength of the saturated fine sandstone[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(4): 49–58.
- [40] 袁璞, 马瑞秋. 不同含水状态下煤矿砂岩 SHPB 试验与分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 2888–2893.
YUAN Pu, MA Ruiqiu. Split hopkinson pressure bar tests and analysis of coalmine sandstone with various moisture contents[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 2888–2893.
- [41] 郑广辉, 许金余, 王鹏, 等. 不同饱水度红砂岩静态本构关系及动态力学性能研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(16): 31–37.
ZHENG Guanghui, XU Jinyu, WANG Peng, et al. Static constitutive relation and dynamic mechanical properties of red sandstone with different water saturation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(16): 31–37.
- [42] WANG P, YIN T B, HU B W. Dynamic tensile strength and failure mechanisms of thermally treated sandstone under dry and water-saturated conditions[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(8): 2217–2238.
- [43] 翟新献, 刘勤裕, 赵晓凡, 等. 不同含水率煤样单轴冲击力学性质试验研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(5): 18–28.
ZHAI Xinxian, LIU Qinyu, ZHAO Xiaofan, et al. Experimental study on mechanical properties of coal specimens with different moisture contents under uniaxial impact[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2023, 42(5): 18–28.
- [44] 赵毅鑫, 龚爽, 黄亚琼. 冲击载荷下煤样动态拉伸劈裂能量耗散特征实验[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(10): 2320–2326.
ZHAO Yixin, GONG Shuang, HUANG Yaqiong. Experimental study on energy dissipation characteristics of coal samples under impact loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(10): 2320–2326.
- [45] ZHOU Z, CAI X, MA D, et al. Dynamic tensile properties of sandstone subjected to wetting and drying cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 182: 215–232.
- [46] ZHAO G, 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): 29.
- [47] 卢芳云, 陈荣, 林玉亮, 等. 霍普金森杆实验技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 23–44.
- [48] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 49: 105–112.
- [49] FREW D J, AKERS S A, CHEN W, et al. Development of a dynamic triaxial kolsky bar[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(10): 105704.
- [50] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(7): 1387–1395.
LI Xibing, ZHOU Zilong, YE Zhouyuan, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008(7): 1387–1395.
- [51] XU Y, YAO W, ZHAO G L, et al. Evaluation of the short core in compression (SCC) method for measuring mode II fracture toughness of rocks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 224: 12106747.
- [52] YAO W, XU Y, XIA K W, et al. Dynamic mode II fracture toughness of rocks subjected to confining pressure[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(2): 569–586.
- [53] YAO W, XU Y, YU C Y, et al. A dynamic punch-through shear method for determining dynamic mode II fracture toughness of rocks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 176: 161–177.
- [54] 金解放, 孙俊涛, 杨洪灏. 高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): 2372–2384.
JIN Jiefang, SUN Juntao, YANG Hongkui. 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): 2372–2384.
- [55] 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: 107084.
- [56] LIU K, ZHANG Q B, WU G, et al. Dynamic mechanical and fracture behaviour of sandstone under multiaxial loads using a triaxial Hopkinson bar[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(7): 2175–2195.
- [57] 罗丹旒, 卢思航, 苏国韶, 等. 含预制单裂隙花岗岩的真三轴单面

- 临空岩爆试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 75–87.
- LUO Danni, LU Sihang, SU Guoshao, et al. Experimental study on rock burst of granite with prefabricated single crack under true-triaxial stress condition with a free face[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(1): 75–87.
- [58] 罗丹旒, 苏国韶, 何保煜. 不同饱和度花岗岩的真三轴岩爆试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1331–1340.
- LUO Danni, SU Guoshao, HE Baoyu. True triaxial test on rock-burst of granites with different water saturations[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(4): 1331–1340.
- [59] 徐松林, 王鹏飞, 赵坚, 等. 基于三维 Hopkinson 杆的混凝土动力学性能研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 180–185.
- XU Songlin, WANG Pengfei, ZHAO Jian, et al. Dynamic behavior of concrete under static triaxial loading using 3D-Hopkinson bar[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 180–185.
- [60] CADONI E, DOTTA M, FORNI D, et al. First application of the 3D-MHB on dynamic compressive behavior of UHPC; proceedings of the 11th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading (DYMAT), Lugano, SWITZERLAND, F Sep 07-11, 2015 [C]/2015.
- [61] XU S L, SHAN J F, ZHANG L, et al. Dynamic compression behaviors of concrete under true triaxial confinement: An experimental technique[J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 140: 18103220.
- [62] DU K, TAO M, LI X B, et al. Experimental study of slabbing and rockburst induced by true-triaxial unloading and local dynamic disturbance[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(9): 3437–3453.
- [63] SU G S, FENG X T, WANG J H, et al. Experimental study of remotely triggered rockburst induced by a tunnel axial dynamic disturbance under true-triaxial conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(8): 2207–2226.
- [64] XIE H P, ZHU J B, ZHOU T, et al. Novel three-dimensional rock dynamic tests using the true triaxial electromagnetic hopkinson bar system[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(4): 2079–2086.
- [65] LIU D, LI D, ZHAO F, et al. Fragmentation characteristics analysis of sandstone fragments based on impact rockburst test[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6(3): 251–256.
- [66] 王文, 李化敏, 顾合龙. 三维动静组合加载含水煤样强度特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2406–2414.
- WANG Wen, LI Huamin, GU Helong. Experimental study of strength characteristics of water-saturated coal specimens under 3D coupled static-dynamic loadings[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(10): 2406–2414.
- [67] HUANG J, LIU X, ZHAO J, et al. Propagation of stress waves through fully saturated rock joint under undrained conditions and dynamic response characteristics of filling liquid[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(8): 3637–3655.
- [68] HUANG J, LIU X L, SONG D Q, et al. Laboratory-scale investigation of response characteristics of liquid-filled rock joints with different joint inclinations under dynamic loading[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(2): 396–406.
- [69] FENG D, SHENG H, KAIWEN X, et al. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split hopkinson pressure bar[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(6): 657–666.
- [70] YAO W, XU Y, XIA K. Damage evolution during rock pulverization induced by dynamic compressive loading[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(5): e2020JB019388.
- [71] HUANG S, XIA K. Effect of heat-treatment on the dynamic compressive strength of Longyou sandstone[J]. *Engineering Geology*, 2015, 191: 1–7.
- [72] XIA K, NASSERI M H B, MOHANTY B, et al. Effects of microstructures on dynamic compression of barre granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(6): 879–887.
- [73] XU Y, YANG Y, LI X, et al. Dynamic compressive test of saturated sandstones under ambient sub-zero temperature[J]. *Experimental Mechanics*, 2023, 63(1): 191–200.
- [74] ZHOU Z W, MA W, ZHANG S J, et al. Effect of freeze-thaw cycles in mechanical behaviors of frozen loess[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 146: 9–18.
- [75] HEILAND J. Laboratory testing of coupled hydro-mechanical processes during rock deformation[J]. *Hydrogeology Journal*, 2003, 11(1): 122–141.
- [76] JIANG, LIYUAN, XU, et al. Effect of water content on the mechanical properties of an artificial porous rock[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(10): 7669–7681.
- [77] PODIO A L, GREGORY A R, GRAY K E. Dynamic properties of dry and water-saturated green river shale under stress[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1968, 8(4): 389–404.
- [78] 王斌, 李夕兵. 单轴荷载下饱水岩石静态和动态抗压强度的细观力学分析[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4): 423–431.
- WANG Bin, LI Xibing. Mesomechanics analysis of static compressive strength and dynamic compressive strength of water-saturated rock under uniaxial load[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(4): 423–431.
- [79] 王浩宇, 许金余, 王鹏, 等. 含水岩石动态抗压强度与微观机制[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(4): 107–111.
- WANG Haoyu, XU Jinyu, WANG Peng, et al. A study of dynamic compressive strength and microscopic mechanism on water-bearing rock[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2016, 17(4): 107–111.
- [80] 王浩宇, 许金余, 王鹏, 等. 水-动力耦合作用下红砂岩力学性质及能量机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2861–2876.
- WANG Haoyu, XU Jinyu, WANG Peng, et al. Mechanical properties and energy mechanism of red sandstone under hydro-dynamic coupling effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(10):

- 2861–2876.
- [81] KIM E, CHANGANI H. Effect of water saturation and loading rate on the mechanical properties of red and buff sandstones[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 88: 23–28.
- [82] KIM E, STINE M A, DE OLIVEIRA D B M, et al. Correlations between the physical and mechanical properties of sandstones with changes of water content and loading rates[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 100: 255–262.
- [83] KIM E, STINE M A, DE OLIVEIRA D B M. Effects of water content and loading rate on the mechanical properties of Berea Sandstone[J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2019, 119(12): 1077–1082.
- [84] ZHOU Z L, CAI X, CAO W Z, et al. Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(8): 3009–3025.
- [85] ZHOU Z L, CAI X, ZHAO Y, et al. Strength characteristics of dry and saturated rock at different strain rates[J]. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2016, 26(7): 1919–1925.
- [86] PETROV Y V, SMIRNOV I V, VOLKOV G A, et al. Dynamic failure of dry and fully saturated limestone samples based on incubation time concept[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(1): 125–134.
- [87] SELYUTINA N S, PETROV Y V. Fracture of saturated concrete and rocks under dynamic loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 225: 106265.
- [88] MA L J, WU J W, WANG M Y, et al. Dynamic compressive properties of dry and saturated coral rocks at high strain rates[J]. *Engineering Geology*, 2020, 272: 105615.
- [89] 王浩宇, 许金余, 刘石. 水-动力耦合作用下红砂岩动态强度及破坏机理[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 22(4): 99–103.
WANG Haoyu, XU Jinyu, LIU Shi. Study of dynamic strength and failure mechanism of red sandstone under condition of hydrodynamic coupling effect[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2021, 22(4): 99–103.
- [90] 谭昊, 巫绪涛. 含水砂岩和大理岩动态冲击性能分析[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(6): 793–824.
TAN Hao, WU Xutao. Dynamic impact performance of water-bearing sandstone and marble[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 2022, 45(6): 793–824.
- [91] CAI X, ZHOU Z L, ZANG H Z, et al. Water saturation effects on dynamic behavior and microstructure damage of sandstone: Phenomena and mechanisms[J]. *Engineering Geology*, 2020, 276: 105760.
- [92] 褚夫蛟, 刘敦文, 陶明, 等. 基于 SHPB 的不同含水状态砂岩动态响应[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(12): 1783–1790.
CHU Fujiao, LIU Dunwen, TAO Ming, et al. Dynamic response of sandstones with different water contents based on SHPB[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(12): 1783–1790.
- [93] 郑广辉, 许金余, 王鹏, 等. 水-岩耦合作用下红砂岩应变率效应研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(1): 79–85.
ZHENG Guanghui, XU Jinyu, WANG Peng, et al. Research on strain rate effects of red-sandstone under water-rock coupling[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(1): 79–85.
- [94] XING H Z, WU G, DEHKHODA S, et al. Fracture and mechanical characteristics of CO₂-saturated sandstone at extreme loading conditions[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 117: 132–141.
- [95] CAI X, ZHOU Z L, DU X M. Water-induced variations in dynamic behavior and failure characteristics of sandstone subjected to simulated geo-stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 130: 104339.
- [96] GU H L, TAO M, LI X B, et al. Dynamic response and meso-deterioration mechanism of water-saturated sandstone under different porosities[J]. *Measurement*, 2021, 167: 108275.
- [97] 金解放, 徐虹, 余雄, 等. 动荷载和含水率对红砂岩破坏及能耗特性的影响[J]. *岩土力学*, 2022, 43(12): 3231–3240.
JIN Jiefang, XU Hong, YU Xiong, et al. Effect of dynamic load and water content on failure and energy dissipation characteristics of red sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(12): 3231–3240.
- [98] MAN K, LIU X L, SONG Z F, et al. Dynamic compression characteristics and failure mechanism of water-saturated granite[J]. *Water*, 2022, 14(2): 216.
- [99] CHU F J, LIU D W, ZHANG X J, et al. Dynamic response and damage regularity of sandstone with different moisture states under cyclic loading[J]. *Fractal and Fractional*, 2022, 6(4): 226.
- [100] CHEN Y, KANG T, WU C. Study on mechanical behavior and mechanism of sandstone under the coupling effect of water content and dynamic load[J]. *Processes*, 2023, 11(8): 2318.
- [101] LI H R, QIAO Y F, HE M C, et al. Effect of water saturation on dynamic behavior of sandstone after wetting-drying cycles[J]. *Engineering Geology*, 2023, 319: 107105.
- [102] GU H, TAO M, LI X, et al. Dynamic tests and mechanical model for water-saturated soft coal with various particle gradations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 132: 104386.
- [103] 王文, 李化敏, 顾合龙, 等. 动静组合加载含水煤样能量耗散特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 3965–3971.
WANG Wen, LI Huamin, GU Helong, et al. Feature analysis of energy dissipation of water-saturated coal samples under coupled static-dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 3965–3971.
- [104] 王文, 李化敏, 袁瑞甫, 等. 动静组合加载含水煤样的力学特征及微观力学分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3): 611–617.
WANG Wen, LI Huamin, YUAN Ruifu, et al. Micromechanics analysis and mechanical characteristics of water-saturated coal

- samples under coupled static-dynamic loads[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 611–617.
- [105] WANG W, WANG H, LI D Y, et al. Strength and failure characteristics of natural and water-saturated coal specimens under static and dynamic loads[J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018: 3526121.
- [106] 葛洪魁, 黄荣樽, 庄锦江, 等. 三轴应力下饱和水砂岩动态弹性参数的试验研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 1994, 18(3): 41–47.
GE Hongkui, HUANG Rongzun, ZHUANG Jinjiang, et al. Experimental study on dynamic and static elastic parameters of water-saturated sands under triaxial stresses[J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science)*, 1994, 18(3): 41–47.
- [107] 张军. 围压条件下含水砂岩的动态力学性能试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016: 18–29.
ZHANG Jun. Experimental study on dynamic mechanical properties of water content sandstone under confining pressure[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2016: 18–29.
- [108] 张军, 高富强, 杨金金. 含水砂岩在不同应变率下的三轴抗压强度分析[J]. *河南城建学院学报*, 2016, 25(2): 37–40.
ZHANG Jun, GAO Fuqiang, YANG Jinjin. Analysis of three axis compressive strength of water bearing sandstone under different strain rates[J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2016, 25(2): 37–40.
- [109] 陈灿灿. 水-岩耦合作用下岩石三轴荷载时效特征及其变形局部化试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022: 51–104.
CHEN Cancan. Experimental study on triaxial time-dependent behaviour and strain localization of rock under water-rock interaction [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022: 51–163.
- [110] 张军. 围压条件下含水砂岩的动态力学性能试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016: 31–57.
ZHANG Jun. Experimental study on dynamic mechanical properties of water content sandstone under confining pressure[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2016: 31–57.
- [111] ZHOU Y, SU S R, CHEN J X. Dynamic response characteristics of dry and water-saturated schist under impact loading[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(12): 3123–3136.
- [112] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵. 三维动静组合加载下岩石力学特性试验初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6): 1179–1190.
GONG Fengqiang, LI Xibing, LIU Xiling. Preliminary experimental study of characteristics of rock subjected to 3D coupled static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1179–1190.
- [113] 牛勇, 李克钢, 李祥龙. 三维动静组合加载下岩石的破坏形态及力学性能研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(4): 33–37, 58.
NIU Yong, LI Kegang, LI Xianglong. Study of failure mode and mechanical properties of rock subjected to 3D coupled static and dynamic loads[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2016, 41(4): 33–37, 58.
- [114] 宋常胜, 王文, 刘凯, 等. 真三轴动静组合加载饱水煤样能量耗散特征[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(5): 2011–2026.
SONG Changsheng, WANG Wen, LIU Kai, et al. Energy dissipation characteristics of water saturated coal samples under true triaxial dynamic and static combined loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 2011–2026.
- [115] 王文, 张世威, KAI L, 等. 真三轴动静组合加载饱水煤样动态强度特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(10): 2010–2020.
WANG Wen, ZHANG Shiwei, LIU Kai, et al. Experimental study on dynamic strength characteristics of water-saturated coal under true triaxial static-dynamic combination loadings[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(10): 2010–2020.
- [116] GONG F Q, SI X F, LI X B, et al. Dynamic triaxial compression tests on sandstone at high strain rates and low confining pressures with split Hopkinson pressure bar[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 113: 211–219.
- [117] ZHOU Z H, CAO P, YE Z Y. Crack propagation mechanism of compression-shear rock under static-dynamic loading and seepage water pressure[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(4): 1565–1570.
- [118] 邹宝平, 罗战友, 徐付军, 等. 热-水-力耦合条件下深部砂岩冲击动力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1750–1761.
ZOU Baoping, LUO Zhanyou, XU Fujun, et al. Experimental study on impact dynamic characteristics of deep sandstone under thermal-hydraulic-mechanical coupling conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1750–1761.
- [119] 高龙山, 徐颖, 吴帮标, 等. 温度损伤大理岩不同含水条件下的动态压缩特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S2): 3826–3833.
GAO Longshan, XU Ying, WU Bangbao, et al. Dynamic compression strength of thermal damaged Fangshan marble on dry and saturated conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S2): 3826–3833.
- [120] LI M, LIN G, ZHOU W, et al. Experimental study on dynamic tensile failure of sandstone specimens with different water contents[J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019: 157012752.
- [121] 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.
- [122] 王登科, 庞晓非, 魏建平, 等. 气体性质和孔隙压力对煤体微裂隙扩展的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 183–192.
WANG Dengke, PANG Xiaofei, WEI Jianping, et al. Effect of gas properties and pore pressure on the microcrack propagation in coal[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 183–192.
- [123] ZHOU Z L, LI X B, ZOU Y, et al. Dynamic BRAZILIAN tests of granite under coupled static and dynamic loads[J]. *Rock Mechan-*

- ics and Rock Engineering, 2014, 47(2): 495–505.
- [124] 李夕兵, 宫凤强, 高科, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 251–260.
LI Xibing, GONG Fengqiang, GAO Ke, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 251–260.
- [125] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(5): 739–748.
- [126] 牛勇, 李克钢, 刘德克, 等. 一维应力预加载下红砂岩冲击力学特性试验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(3): 409–416.
NIU Yong, LI Kegang, LIU Deke, et al. Experimental investigation on impact dynamics properties of red sandstone subjected to one-dimensional stress preloading[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(3): 409–416.
- [127] CHEN R, LI K, XIA K W, et al. Dynamic fracture properties of rocks subjected to static pre-load using notched semi-circular bend method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(10): 3865–3872.
- [128] DU H B, DAI F, LIU Y, et al. Dynamic response and failure mechanism of hydrostatically pressurized rocks subjected to high loading rate impacting[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 129: 14105927.
- [129] YAO W, XIA K, ZHANG T. Dynamic fracture test of laurentian granite subjected to hydrostatic pressure[J]. *Experimental Mechanics*, 2019, 59(2): 245–250.
- [130] 周子龙, 蔡鑫, 周静, 等. 不同加载率下水饱和砂岩的力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 4069–4075.
ZHOU Zilong, CAI Xin, ZHOU Jing, et al. Mechanical properties of saturated sandstone under different loading rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 4069–4075.
- [131] REHBINDER P, LICHTMAN V. Effect of surface active media on strain and rupture in solids[J]. *Proceedings of the Second International Congress of Surface Activity*, 1957, 3: 563–580.
- [132] KARPENKO A G V. The 45th anniversary of the Rebinder effect[J]. *Soviet materials science: A transl of Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov / Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, 1975, 10(1): 3–4.
- [133] FREIMAN S W. Effects of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B6): 4072–4076.
- [134] HADIZADEH J, LAW R D. Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1991, 28(5): 431–439.
- [135] 刘驰, 刘晓丽, 张东, 等. 软岩软化的水岩界面动力学模型及其演化规律[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2280–2289.
LIU Chi, LIU Xiaoli, ZHANG Dong, et al. Dynamic model for water-rock interface of softening of soft rock and its evolution law[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(12): 2280–2289.
- [136] MOORE D E, LOCKNER D A. Crystallographic controls on the frictional behavior of dry and water-saturated sheet structure minerals[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B3).
- [137] YATES D E, HEALY T W. The structure of the silica/electrolyte interface[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1976, 55(1): 9–19.
- [138] BAUDIN I, RICARD A, AUDEBERT R. Adsorption of dextrans and pullulans at the silica-water interface, hydrodynamic layer thickness measurements, role in the fouling of ultrafiltration membranes[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1990, 138(2): 324–331.
- [139] ZHOU Z, CAI X, MA D, et al. Water saturation effects on dynamic fracture behavior of sandstone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 114: 46–61.
- [140] 陈明, 卢文波, 严鹏, 等. 爆破开挖对岩体含水裂纹扩展的扰动机制[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1555–1560.
CHEN Ming, LU Wenbo, YAN Peng, et al. Disturbance mechanism of blasting excavation to aquiferous rock crack propagation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1555–1560.
- [141] LI Q M, LU Y B, MENG H. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part II: Numerical simulations[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(12): 1335–1345.
- [142] ZHANG M, WU H J, LI Q M, et al. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part I: Experiments[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(12): 1327–1334.
- [143] FORRESTAL M J, WRIGHT T W, CHEN W. The effect of radial inertia on brittle samples during the split Hopkinson pressure bar test[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(3): 405–411.
- [144] ROSSI P, VAN MIER J G M, BOULAY C, et al. The dynamic behaviour of concrete: Influence of free water[J]. *Materials and Structures*, 1992, 25(9): 509–514.
- [145] ROSSI P, VAN MIER J G M, TOUTLEMONDE F, et al. Effect of loading rate on the strength of concrete subjected to uniaxial tension[J]. *Materials and Structures*, 1994, 27(5): 260–264.