

高压高应力裂隙岩石动态强度特性试验研究

金解放¹, 廖强强¹, 陈 萌², 熊慧颖¹, 肖筱丰¹, 彭孝旺¹

(1. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 深部工程岩体内部存在大量的原生裂隙, 复杂的高水压高应力环境是影响工程岩体动态强度特性的重要因素。为探究裂隙和高水压力对岩石动态强度特性的影响, 采用自主研发的高水压高地应力岩石动力学试验装置, 制备 5 种不同裂隙倾角的红砂岩试件, 开展 6 个水压力梯度下冲击试验。研究表明: 随着水压力和裂隙倾角的增大, 裂隙岩石动态应力-应变曲线峰后特征逐渐由塑性转变为弹性后效, 曲线特征大致分为 3 个阶段。裂隙倾角相同时, 裂隙岩石动态峰值应力随水压力的增加先增大后小幅减小, 动态峰值应力与水压力之间服从良好的高斯函数分布; 随水压力的增加, 平均应变率均呈现先减小后增大的趋势。相同水压力作用下, 裂隙岩石动态峰值应力随裂隙倾角的增大整体呈先缓慢增加后快速上升的趋势, 变化趋势受裂隙岩石径向连通率和应力波斜入射的影响; 平均应变率随裂隙倾角的增大逐渐减小。裂隙岩石动态峰值应力与平均应变率具有明显的负线性关系。

关键词: 岩石力学; 高水压力; 裂隙岩石; 动态强度; 平均应变率

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)05-1133-13

Experimental study on dynamic strength characteristics of fractured rocks under high water pressure and high stress

JIN Jiefang¹, LIAO Qiangqiang¹, CHEN Meng², XIONG Huiying¹, XIAO Youfeng¹, PENG Xiaowang¹

(1. School of Civil and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2. School of Resource and Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: Numerous pre-existing fractures within deep engineered rock masses and the complex hydraulic environment, significantly affect the dynamic strength characteristics of these engineered rock masses. To investigate the effects of fractures and high water pressure on the dynamic strength characteristics of rocks, five types of red sandstone specimens with different fracture inclination angles were prepared. Impact tests were carried out under six water pressure gradients using a self-developed rock dynamics testing device capable of simulating high water pressure and high geo-stress conditions. The results indicate that with the increase of water pressure and fracture inclination angle, the dynamic stress-strain curve of the fractured rock is gradually transformed from plastic to elastic after-effects after the peak. The curve characteristics can be categorized into three stages. When the fracture inclination angle is fixed, the dynamic peak stress of the fractured rock initially increases with rising water

收稿日期: 2024-08-19; **修回日期:** 2024-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174112); 江西省自然科学基金资助项目(20232ACB204015)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 52174112) and Jiangxi Provincial Natural Science Foundation(Grant No. 20232ACB204015)

作者简介: 金解放(1977-), 男, 2002年毕业于焦作工学院(现河南理工大学)建筑工程系, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石动力学方面的教学与研究工作。E-mail: jjf_chang@126.com

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0632

pressure, followed by a slight decreases. The relationship between dynamic peak stress and water pressure follows a Gaussian distribution. As water pressure increases, the average strain rate first decreases and then increases. Under the same water pressure, the dynamic peak stress of fractured rock generally exhibits a trend of slow initial increase followed by a rapid rise as the fracture inclination angle increases, and this trend is influenced by the radial connectivity of the fractured rock and the oblique incidence of stress waves. Moreover, the average strain rate gradually decreases with the increase of fracture inclination angle. A clear negative linear relationship is observed between the dynamic peak stress of the fractured rock and the average strain rate.

Key words: rock mechanics; high water pressure; fractured rocks; dynamic strength; average strain rate

1 引 言

在交通强国建设和深地空间开发的驱动下,越来越多的工程项目不断向深部推进^[1-2]。深部工程岩体多处于高水压高地应力环境中,其地质构造复杂,通常包含节理、缺陷和空洞等不连续结构,这些不连续结构对岩体造成初始损伤,控制着裂隙岩体的动态力学行为和破坏特性^[3-4]。在爆破开挖过程中裂隙岩体易引发突水、突泥等重大地质灾害。考虑到深部岩体与浅层岩体在力学行为和赋存环境上的差异,研究深部高水压下裂隙岩体的动态强度特性,对地下工程安全建设至关重要。

节理是岩体中广泛存在的软弱结构面,对于非填充节理,岩石之间接触较为紧密,节理常表现为贯通型裂隙^[5]。贯通型裂隙岩体的物理力学性能较连续岩体更为复杂,其强度和变形特性受裂隙影响显著。在静态加载过程中,裂隙岩石峰值强度明显低于完整岩石^[6]。在利用冲击试验模拟裂隙石的动态响应特性时,多采用预制单裂隙、交叉裂隙、多裂隙的岩石试件,分别模拟研究裂隙长度、倾角和间距对裂隙岩石动态强度变形和裂纹扩展的影响^[7-8]。裂隙倾角的改变会影响岩石的几何构型和应力状态,进而影响裂隙岩石动态强度、变形、能量耗散和破坏特性^[9-12]。随着裂隙倾角的增大,裂隙岩体的动态峰值应力、动态峰值应变、动态弹性模量等力学参数呈逐渐增大的趋势;动荷载与裂隙面的夹角为 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时,能量利用效率将显著提高^[9-10],同时,破坏模式则由完整岩石的劈裂拉伸破坏为主向含裂隙岩石的剪切破坏为主转变^[11]。随着冲击气压的增大,裂隙岩石动态峰值应力和峰值应变均增大,呈现出明显的率效应,而应变率对主要破坏模式几乎没有影响,但会增加裂隙岩石的破碎程度^[12]。从上述研究可以发现,裂隙对岩体动态力学响应特性

有非常显著的影响,但仅单独考虑了静应力或应变率等因素的影响,未考虑地下水对裂隙岩石动态强度特性的影响。

地下水是影响岩体力学响应特性的重要因素,随着岩石含水率的增加,在静态加载过程中,由于水楔效应的影响,单轴峰值应力和稳定性随饱和度的增加出现明显的弱化现象^[13-14]。随着饱水时间的延长,裂隙岩体单轴抗压强度会逐步弱化,破坏模式总体向剪切破坏模式发展^[15]。在高加载率下含水率对完整岩石的动态力学特性具有明显饱水强化现象^[16];裂隙岩石也同样存在饱水强化的现象,且裂隙岩石动态峰值应力、动态峰值应变和动弹性模量等随裂隙倾角的演化趋势不受含水率的影响^[17]。为研究深部高水压环境下岩石动态力学性能,金解放等^[18-20]研制了高水压高应力岩石动态加载试验装置,并选用完整岩石试件开展试验研究。水压力对岩石动态应力-应变曲线峰前力学特性和峰后应力跌落行为具有较大影响,动荷载作用下水的黏性效应和岩石外部的围压水对动态强度有增强作用^[18]。能量耗散率随水压力的增大先上升后下降^[19],峰后破坏不稳定性逐渐增大,发生突水灾害的倾向性越强烈^[20]。对于深部工程岩体而言,水压力和原生裂隙共同影响宏观裂纹和微裂纹的萌生、扩展,控制着裂隙岩石的动态强度特征。上述研究成果仅单独考虑了含水率、水压力和裂隙等因素的影响,亟待开展深部高水压环境下裂隙岩石动态强度特性的研究。

本文旨在研究水压力与裂隙倾角对岩石强度特性的影响。以裂隙岩石作为试验对象,开展不同裂隙倾角及水压力作用下的冲击试验。拟分析裂隙倾角和水压力对裂隙岩石动态峰值应力、平均应变率影响规律,构建裂隙岩石动态峰值应力与水压力和平均应变率的演化经验模型,揭示高水压对裂隙岩石动态强度特性的影响机制。

2 试验方案

2.1 试件制备

选用红砂岩为试验对象，其均质性较好，将红砂岩加工成 $\phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱形试件，试件端面平整度误差 $< \pm 0.02\text{ mm}$ ，不垂直度 $< 0.001\text{ rad}$ ^[21]。完整红砂岩密度为 2.37 g/cm^3 ，纵波波速为 $2\,753.44\text{ m/s}$ ，单轴抗压强度 82 MPa 。在完整红砂岩试件的侧面轴心位置加工贯通型裂隙，定义裂隙倾角 α 为裂隙面法线与动载荷加载方向的夹角，分别设置为 0° ， 22.5° ， 45° ， 67.5° ， 90° 共计 5 种角度，裂隙宽度 15 mm 、厚度为 1.5 mm ，裂隙沿径向贯通，裂隙岩石试件的几何示意图如图 1 所示。

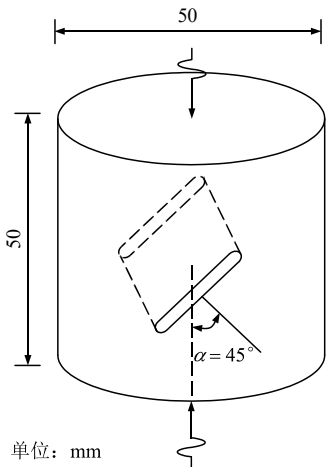


图 1 裂隙岩石试件几何尺寸示意图 ($\alpha = 45^\circ$)

Fig.1 Schematic geometry of fractures rock specimen ($\alpha = 45^\circ$)

2.2 试验装置

通过使用自主研发的高水压高地应力岩石动力

学测试系统进行试验，该系统的创新点在于，在现有的动静组合加载系统的基础上额外增加了高水压加载模块，使其能够同时对裂隙岩石试件施加高地应力和高水压力，模拟深部工程岩体的实际赋存环境，示意图如图 2 所示。关于此试验装置的详细介绍，可参考金解放等^[18]，本文不再赘述。

通过充水条件下的无岩石试件冲击试验显示，入射波透射率高达 99% ^[20]，高水压加载装置不影响一维应力波传播，装置可用于深部高水压环境下裂隙岩石动态响应试验研究。

2.3 试验方法

为聚焦高水压对裂隙岩石动态强度的影响研究，试验过程中固定轴向静应力为 27 MPa ，冲击速度为 20 m/s 。水压力分别设置为 0 ， 5 ， 10 ， 15 ， 20 ， 25 MPa 。试验前，对裂隙岩石试件进行饱水，确保在进行水压力加载前均达到饱和状态。试验时，将岩石试件端面均匀涂抹耦合剂后放置于入射杆和透射杆中间，并保持轴线对齐。将轴压值和水压值加载至试验工况值，加载过程中先加载轴向静应力后加载水压力，且轴向静应力须始终大于水压力值，以确保岩石试件与弹性杆紧密接触。调整冲击气压及冲头的初始位置，使冲击速度稳定在 20 m/s 。采用激光测速仪测定冲头速度，超动态应变仪与示波器采集得到冲击试验中的应力波信号。裂隙岩石试件动态冲击示意图如图 3 所示，其中， σ_s 为轴向静应力、 σ_w 为水压力， σ_d 为冲击载荷。

2.4 试验原理

在高应变率加载条件下，动态应力的平衡是确保试验数据准确性的关键因素。本文试验的动态应力平衡曲线如图 4 所示。由图可知，当岩石试件达到动态应力平衡时，入射波与反射波的总和与透射

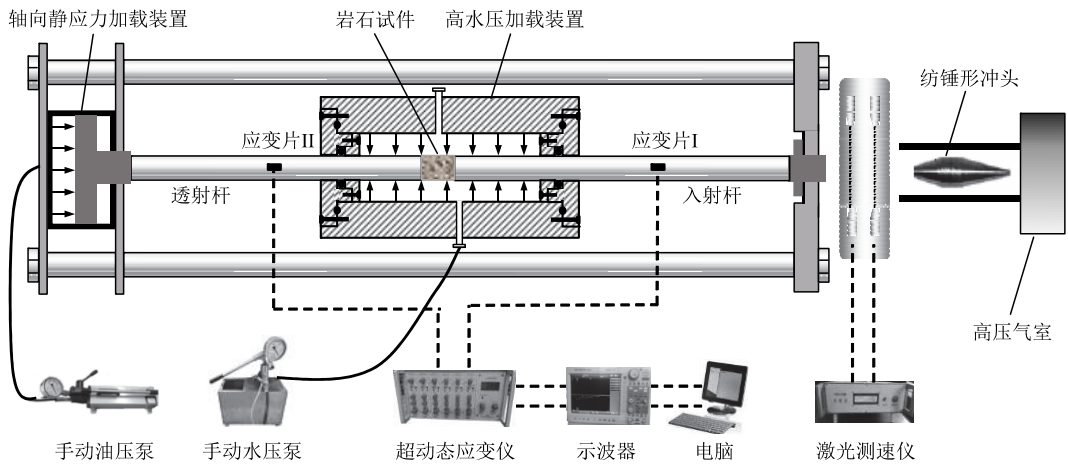


图 2 高水压高地应力岩石动力学测试试验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of high water pressure and high stress rock dynamics testing system

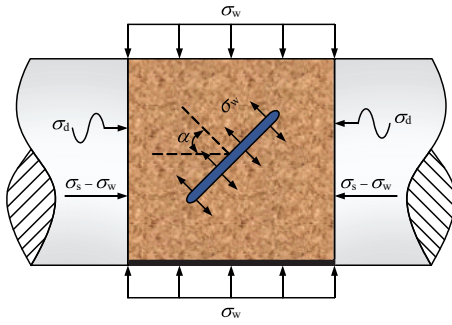


图3 裂隙岩石试件动态冲击示意图

Fig.3 Schematic diagram of dynamic impact on fractured rock specimen

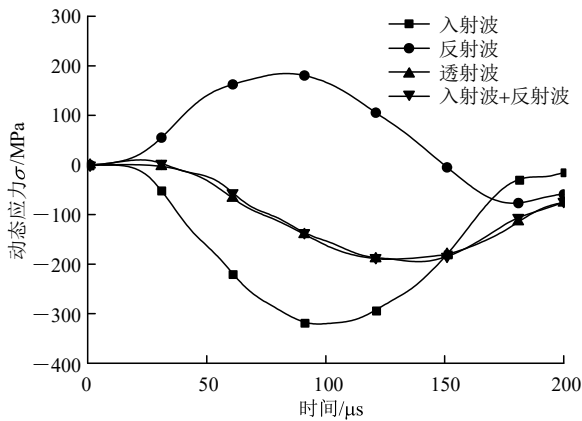


图4 动态应力平衡曲线

Fig.4 Dynamic stress equilibrium curves

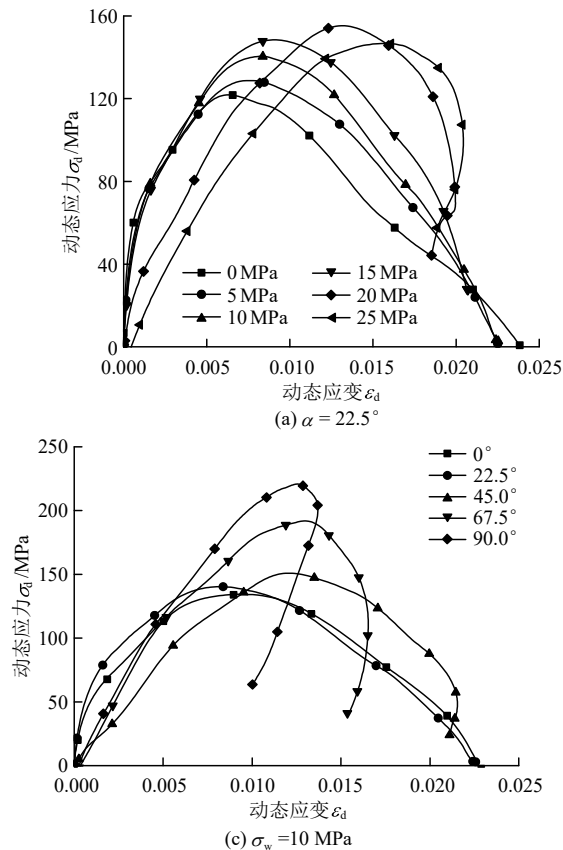
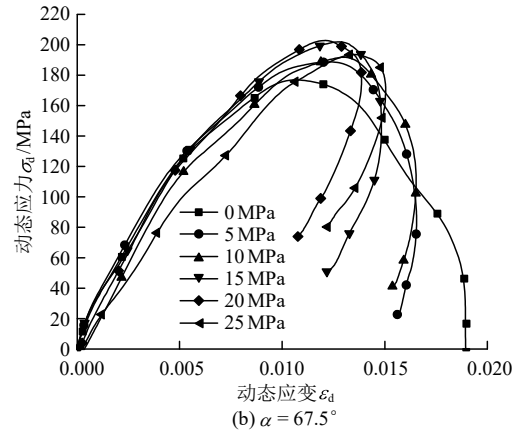
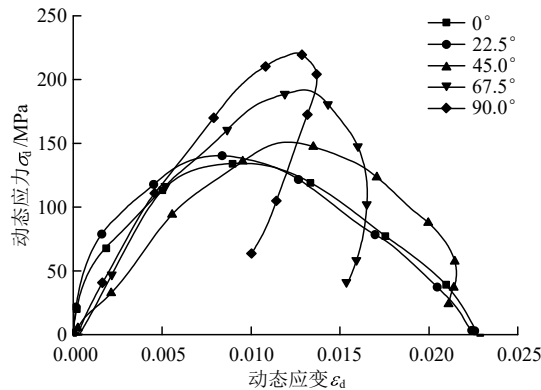
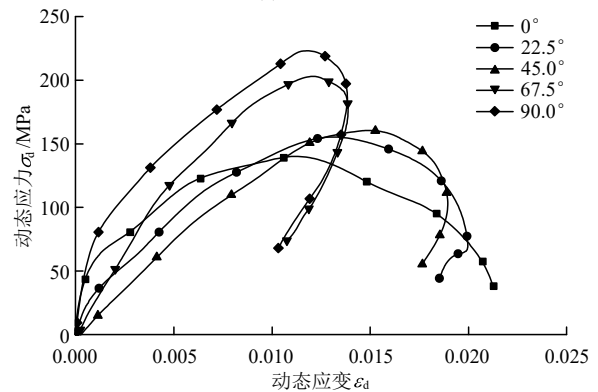
(a) $\alpha = 22.5^\circ$ (b) $\alpha = 67.5^\circ$ (c) $\sigma_w = 10 \text{ MPa}$ (d) $\sigma_w = 20 \text{ MPa}$

图5 不同工况下裂隙岩石的动态应力-应变曲线

Fig.5 Dynamic stress-strain curves of fractured rock under different working conditions

波曲线重合。这表明所使用的高水压高地应力岩石动力学测试试验系统满足动态应力平衡条件。因此,一维应力波理论可用于推导动态应力、应变和应变率。

基于一维应力波理论,冲击荷载下裂隙岩石试件的动态应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$, 可由如下公式计算:

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (1)$$

$$\sigma(t) = \frac{AE}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{L_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_R(t)$, $\varepsilon_T(t)$ 分别为冲击荷载加载过程中 t 时刻的入射波、反射波和透射波; C_0 , E , A 分别为弹性杆的应力波传播速度、弹性模量及横截面面积; A_s 和 L_s 分别为试件的横截面面积和长度。

3 试验结果

3.1 水压力和裂隙倾角对动态应力-应变曲线的影响

通过式(1)~(3)可计算得到不同试验工况下的动态应力-应变曲线,如图5所示。

由图 5 可以看出, 水压力和裂隙倾角对裂隙岩石的动态应力-应变曲线有显著的影响。根据峰后卸载模量 M 的正、负值可划分为 I 和 II 型 2 种形态, 峰后卸载模量为负值表现为 I 型, 正值表现为 II 型。相同裂隙倾角条件下, 水压力较小时, 应力-应变曲线峰值表现为 I 型, 水压力较大时, 峰后曲线表现为 II 型, 峰值阶段的卸载模量由负值逐渐变为正值, 表现出明显的弹性后效特征, 岩石试件仍具有承载能力, 当水压力较大时, 部分岩石未发生宏观破坏。裂隙岩石动态峰值应力先增大后减小; 峰后极限应变先减小后增大, 残余应变逐渐小于极限应变。相同水压力工况下, 随着裂隙倾角的增大, 裂隙岩石动态应力-应变曲线也将由 I 型逐渐向 II 型转变, 峰后特征逐渐由塑性转变为弹性后效, 裂隙岩石的破坏程度逐渐减轻, 直至未发生宏观破坏; 裂隙岩石动态峰值应力逐渐增大, 峰后极限应变逐渐减小, 残余应力逐渐增加。

3.2 I 型和 II 型动态应力-应变曲线

由图 5 可以看出, 在相同大小的冲击载荷作用下, 高水压高应力裂隙岩石的动态应力-应变曲线有 I 和 II 型 2 种类型。为了深入研究高水压高应力裂隙岩石动态应力-应变曲线的变化特性, 选取典型的 I 和 II 型曲线进行分析, 如图 6 所示。

由图 6(a)可以看出, 在固定的轴向静应力和冲击载荷工况下, 当水压相对较小时, 裂隙岩石的动态应力-应变曲线属于 I 型。其中, OA 段近似呈直线型, 表现出良好的弹性性能; AB 段切线斜率逐渐减小, 表明在动载荷作用下裂隙岩石内部微裂纹逐渐萌生、扩展, 导致动态损伤程度增加, 裂隙岩石抵抗动载荷的能力逐渐减弱。定义 AB 段为裂纹快速扩展阶段; BC 段的动态应力随着动态应变的增加而减小, 直至岩石试件发生宏观破坏, 定义 BC 段为峰后破坏阶段。

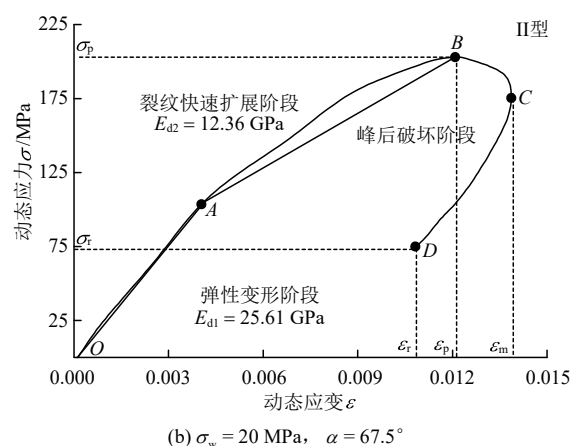
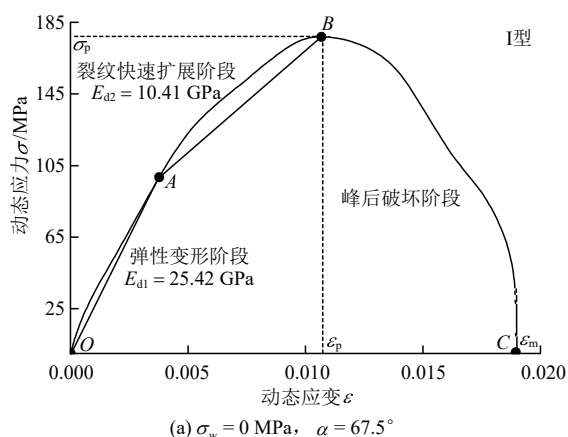


图 6 高水压高应力裂隙岩石典型动态应力-应变曲线
Fig.6 Typical dynamic stress-strain curves for high water pressure and high stress fractured rocks

在轴向静应力和水压力共同作用下, 裂隙岩石初始微裂隙被水填充, 导致在受到动荷载时, 孔隙水抑制了由动荷载所引起的孔隙压缩变形, 使得动态应力-应变曲线未出现初始孔隙压密阶段^[20], 直接进入弹性变形阶段。在裂纹快速扩展阶段, 动荷载施加于岩石的动态应力逐渐增大, 其应力与应变呈非线性增长趋势, 裂隙岩石发生塑性变形, 直至点 B 到达峰值应力, 裂隙岩石试件发生宏观破坏时的动态峰值应力称为动态抗压强度。

由图 6(b)可以看出, 在固定的轴向静应力和冲击载荷工况下, 当水压足够大时, 裂隙岩石的动态应力-应变曲线属于 II 型。与图 6(a)所示的 I 型曲线相比, II 型动态应力-应变曲线也有弹性阶段 OA 和裂纹快速扩展阶段 AB , 但 AB 段的割线模量下降相对较小。II 型动态应力-应变曲线的峰后段包括短暂的 BC 段和占比较大的 CD 段, 其中 BC 段的动态应力随着动态应变的增加而增大; 而 CD 段的动态应力随着动态应变的减小逐渐减小, 即 CD 属于动态应力卸载阶段, 且 CD 段的割线近似平行于 OA 段的割线, 表现出明显的弹性后效特征。同理, 定义曲线最高点 B 对应的应力为动态峰值应力。

为了更好地表征水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态力学特性的影响, 根据不同试验工况下裂隙岩石的动态应力-应变曲线, 选取峰值应力 σ_p , 平均应变率 $\dot{\epsilon}$ 等参数, 统计是否发生宏观破坏, 如表 1 所示。

4 裂隙岩石的动态强度特性

4.1 水压力对动态峰值应力的影响规律

动态峰值应力指裂隙岩石在冲击过程中所承受

表 1 不同工况下裂隙岩石动态试验结果

Table 1 Dynamic test results of fractured rock under different working conditions

裂隙倾角 $\alpha /(^{\circ})$	水压力 σ_w/MPa	峰值应力 σ_p/MPa	平均应变率 $\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	是否发生 宏观破坏
0	0	109.80	215.17	是
	5	121.25	202.99	是
	10	134.46	189.88	是
	15	137.85	186.95	是
	20	140.07	181.76	是
	25	138.69	177.71	是
22.5	0	121.85	210.35	是
	5	128.77	196.51	是
	10	140.42	184.52	是
	15	148.44	175.32	是
	20	155.28	171.94	是
	25	146.73	178.35	是
45.0	0	130.22	195.47	是
	5	144.49	182.41	是
	10	151.03	175.77	是
	15	154.46	165.33	是
	20	160.41	163.29	是
	25	152.28	175.96	是
67.5	0	176.94	150.83	是
	5	188.83	141.95	是
	10	191.85	142.25	是
	15	202.00	134.30	否
	20	202.92	126.68	否
	25	193.59	137.33	否
90.0	0	187.62	133.30	是
	5	209.05	131.94	是
	10	220.81	129.97	否
	15	223.02	129.34	否
	20	223.17	128.73	否
	25	216.00	130.49	否

的最大动态应力。当裂隙岩石发生宏观破坏时，动态峰值应力即为裂隙岩石的动态抗压强度，反映裂隙岩石所能承受的最大冲击荷载。根据表 1 中的试验结果，裂隙岩石动态峰值应力随水压力的变化关系如图 7 所示。

由图 7 可以看出，固定轴向静应力和裂隙倾角，随水压力的增大，裂隙岩石动态峰值应力呈逐渐增加的趋势。当水压力超过一定值时，裂隙岩石动态峰值应力出现略微下降的趋势。以裂隙倾角 $\alpha = 22.5^{\circ}$ 为

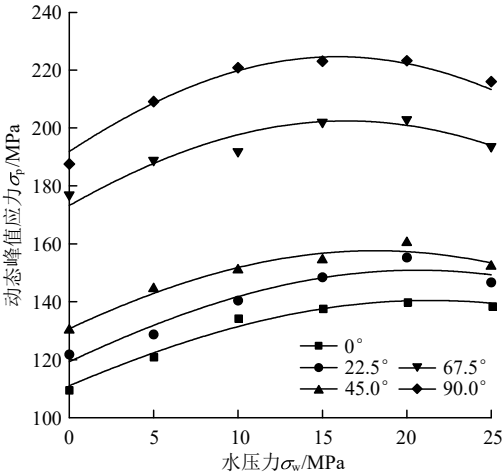


图 7 裂隙岩石动态峰值应力与水压力的关系

Fig.7 The relationship between dynamic peak stress and water pressure in fractured rock

例，当裂隙倾角保持不变时，水压力由 0 MPa 增加至 20 MPa，动态峰值应力的增长幅度为 21.53%，水压力由 20 MPa 增加至 25 MPa 时，动态峰值应力的降低幅度为 5.50%。由图 7 还可以看出，裂隙倾角的增大对岩石动态峰值应力具有明显的强化作用。

结合图 7 和表 1 可以看出，不同裂隙倾角下，岩石动态峰值应力随水压力的演化趋势均保持一致，但破坏程度却不同。当裂隙倾角为 0° ， 22.5° 和 45° 时，所有水压力工况下的岩石均发生宏观破坏，此时在高水压力下动态峰值应力出现下降的趋势，这是由于其动态抗压强度不足造成的。当固定裂隙倾角为 67.5° 时，水压力超过 15 MPa 后，裂隙岩石未发生宏观破坏；当固定裂隙倾角为 90° 时，水压力超过 10 MPa 后，裂隙岩石未发生宏观破坏。此时，外部冲击荷载未达到裂隙岩石的动态抗压强度，峰值应力的下降与岩石试件内部微裂隙的扩展有关，不能简单归结为动态抗压强度不足所导致的。

为定量分析裂隙岩石动态峰值应力与水压力之间的影响关系，运用下式对图 7 中的数据点进行拟合：

$$\sigma_p = \beta \exp \left[-\frac{(\sigma_w - \sigma_c)^2}{\varphi^2} \right] \quad (4)$$

式中， σ_p 为动态峰值应力(MPa)； σ_w 为当前工况下的水压力(MPa)； β ， σ_c ， φ 为拟合参数，量纲均为 MPa。

当 $\sigma_c = \sigma_w$ 时，动态峰值应力为固定倾角下的最大值，因此定义 σ_c 为临界水压力，量纲为 MPa。定义 β 为当前倾角下的最大动态峰值应力，反映裂

隙岩石动态峰值应力的变化速率，量纲为 MPa。 φ 为水压力对动态峰值应力的影响范围，定义参数 φ 为水压力敏感因子，量纲为 MPa。

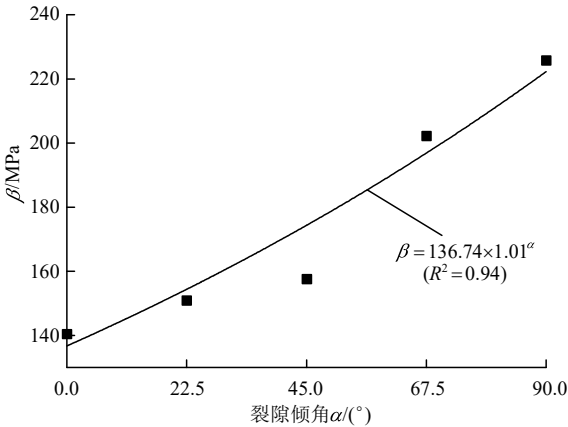
裂隙岩石动态峰值应力与水压力的拟合结果如表 2 和图 7 所示。由图 7 和表 2 可以看出，式(4)拟合不同裂隙倾角岩石动态峰值应力与水压力的相关系数均大于 0.85，拟合曲线与试验数据的吻合度较高，表明裂隙岩石动态峰值应力与水压力之间满足良好的高斯函数关系。

表 2 裂隙岩石动态峰值应力与水压力之间的拟合结果
Table 2 Fitting results between dynamic peak stress and water pressure in fractured rock

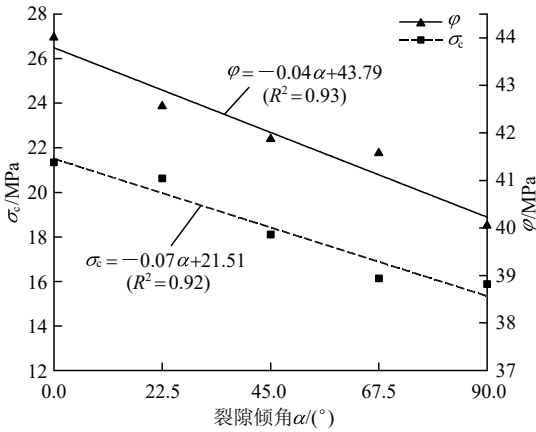
σ_s /MPa	裂隙倾角/ $^\circ$	β /MPa	σ_c /MPa	φ /MPa	R^2
27	0.0	140.50	21.35	44.00	0.98
	22.5	150.91	20.63	42.56	0.91
	45.0	157.62	18.11	41.87	0.94
	67.5	202.21	16.14	41.57	0.89
	90.0	225.84	15.89	40.04	0.97

根据表 2 中的拟合结果，拟合参数 β 、 σ_c 和 φ 与裂隙倾角的关系如图 8 所示。由图 8 可以看出，最大动态峰值应力 β 、临界水压力 σ_c 和水压力敏感因子 φ 与裂隙倾角均满足良好的函数关系，拟合相关系数分别为 0.94，0.92 和 0.93，拟合程度较高。最大动态峰值应力 β 随倾角的增大而逐渐增大，表明裂隙倾角对岩石动态峰值应力影响显著，裂隙倾角的增大能够促进岩石动态峰值应力快速增大。临界水压力 σ_c 和水压力敏感因子 φ 均随裂隙倾角的增大而逐渐减小，表明随着裂隙倾角的增大，水压力对动态峰值应力的强化效果逐渐减弱，体现在随水压力的增大，动态峰值应力的增长幅度缩小。

分析认为，裂隙砂岩作为一种多孔隙体，由岩石骨架、预制裂隙和孔隙组成。饱水裂隙岩石直接



(a) 最大动态峰值应力 β 随裂隙倾角的变化



(b) 临界水压力 σ_c 和水压力敏感因子 φ 随裂隙倾角的变化
图 8 拟合参数 β 、 σ_c 和 φ 与裂隙倾角的关系

Fig.8 Fitted parameters β , σ_c and φ versus fracture inclination angle

浸泡在高水压环境中，由于液体内部压力具有各向同性，使得岩石的轴向、径向和预制裂隙内部均承受相应的水压力，裂隙岩石静态受力示意图如图 9 所示。根据有效应力原理，其轴向应力将受到相应的折减，即有效轴向应力为

$$\sigma_n = \sigma_s - \sigma_\mu - (1 - k \sin \alpha) \sigma_w \tag{5}$$

式中： σ_s 为轴向静应力， σ_μ 为孔隙水压力， k 为裂隙岩石径向连通率， σ_w 为水压力。

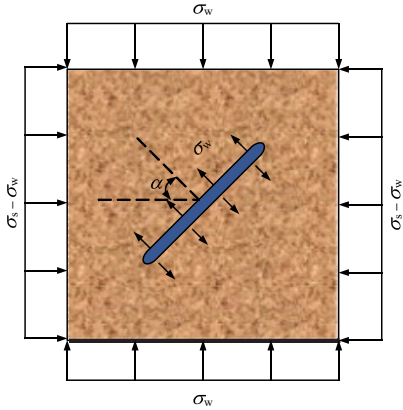


图 9 裂隙岩石静态受力示意图
Fig.9 Schematic diagram of static force application on fractured rock

结合式(5)和图 9 可以看出，在轴向静应力和水压力加载过程中，水压力 σ_w 的存在，一方面对岩石的径向变形具有约束作用，一定程度上限制微裂纹的萌生和扩展，降低动载荷作用下裂隙岩石发生动态损伤的概率；另一方面水压力 σ_w 将作用于岩石端面和预制裂隙的内部，产生与轴向静应力相反的作用力，从而降低岩石在轴向的有效应力 σ_n ，提升岩石抵抗轴向变形的能力^[22]。

在动态加载过程中, 由于孔隙水引起的 Stefan 效应、水的表面张力引起的弯液面效应和牛顿内摩擦效应等^[16], 使得在高加载率下高压水能增强岩石的动态力学性能。另外, 在冲击荷载作用下, 裂隙岩石在裂纹快速扩展阶段和峰后破坏阶段所产生的微裂隙无法瞬间被水填充, 导致新萌生的微裂纹处于非饱和的负压状态, 有效阻止微裂纹进一步的扩展成核^[23], 减缓裂隙岩石在峰后的变形破坏。上述过程是裂隙岩石动态峰值应力随水压力的增大而逐渐增大的主要原因。

当超过临界水压力时, 水压力对动态峰值应力的作用效果受裂隙倾角的影响, 即式(5)中 k 值的影响。当裂隙倾角较小时, 所有水压力工况均发生宏观破坏, 峰值应力的下降是由于裂隙岩石动态抗压强度不足造成的。其主要原因在于预制裂隙沿径向贯通岩石, 在水压力的作用下岩石的有效应力降低, 并且使外部压力水向岩石内部渗透加快, 从而改变岩石应力状态和内部孔隙水压力 σ_μ 的大小。较大的孔隙水压力会促进岩石微裂纹萌生、扩展和成核, 岩石微裂隙数量增多、损伤程度加大, 劣化岩石静态力学性能^[24], 使得岩石试件在冲击荷载加载前就产生了静态损伤。随着裂隙倾角的增大, 超过临界水压力的岩石试件未发生宏观破坏, 即岩石试件并未达到其动态抗压强度, 此时峰值应力的下降也是由动荷载加载前的静态损伤引起的, 裂隙岩石未发生宏观破坏主要是受裂隙倾角增大所产生的强化效果的影响。

综上所述, 水压力对裂隙岩石静态和动态力学特性均具有显著的影响, 裂隙岩石动态峰值应力随水压力的演化趋势是多因素耦合的结果。总体上看, 水压力对裂隙岩石动态峰值应力具有明显的强化作用, 裂隙的存在加剧了孔隙水压力对岩石的静态损伤, 倾角的增大对裂隙岩石动态强度特性具有显著的影响, 使得裂隙岩石动态峰值应力随水压力的演化趋势不同于完整岩石。

4.2 裂隙倾角对动态峰值应力的影响规律

为更好地分析动态峰值应力随裂隙倾角的变化规律, 根据表 1 中的试验结果, 不同水压力工况下, 裂隙岩石动态峰值应力与裂隙倾角的变化关系如图 10 所示。

由图 10 可知, 在相同的水压力条件下, 随着裂隙倾角的增大, 裂隙岩石动态峰值应力逐渐增大, 裂隙倾角越大, 动态峰值应力的变化范围越大。即在相同的加载方式和应力条件下, 对于贯通型裂隙

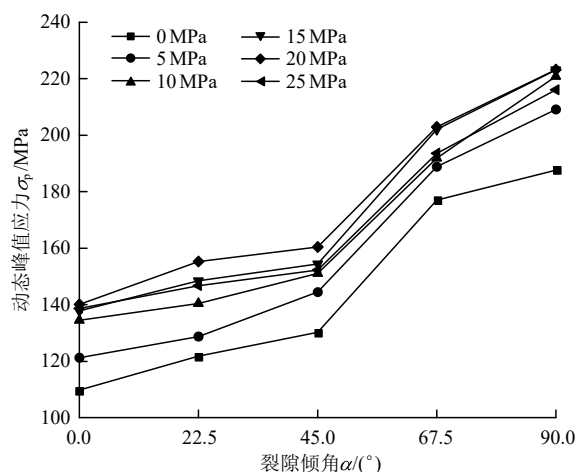


图 10 裂隙岩石动态峰值应力与裂隙倾角的关系

Fig.10 The relationship between the dynamic peak stress of fractured rock and the fracture inclination angle

岩石, 当动载荷与裂隙法线的夹角为 0° (即动载荷与裂隙面垂直) 时, 岩石动态峰值应力最低; 当动载荷与裂隙面法线的夹角为 90° 时, 岩石动态峰值应力最高。裂隙岩石动态峰值应力随裂隙倾角的变化趋势存在一个临界角度, 当倾角 $< 45^{\circ}$ 时, 裂隙岩石动态峰值应力随倾角的增长速率相对缓慢, 随着裂隙倾角的持续增大, 动态峰值应力快速增加, 整体呈现出先缓慢增加后快速上升的趋势。以 10 MPa 水压力工况为例, 当裂隙倾角由 0° 增加至 45° 时, 裂隙岩石峰值应力的增长幅度仅为 10.97%, 而裂隙倾角由 45° 增加至 90° 时, 裂隙岩石峰值应力的增长幅度为 31.60%。

在水压力的作用下, 裂隙岩石的动态峰值应力随裂隙倾角的演化关系与饱和和干燥条件下的规律存在显著差异。由图 11 可以看出, 随裂隙倾角的增大, 饱和和干燥裂隙岩石动态峰值应力先减小后

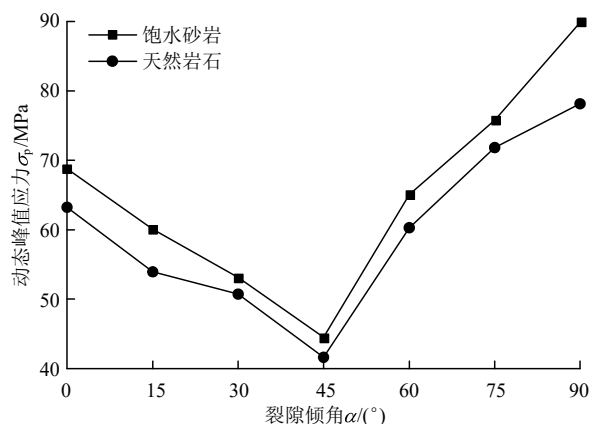


图 11 不同饱和度岩石动态峰值应力与裂隙倾角的关系^[17]

Fig.11 The relationship between the dynamic peak stress of rocks with different saturation levels and the fracture inclination angle^[17]

增大, 裂隙倾角为 45° 时, 动态峰值应力值最小, 且饱水裂隙岩石的动态峰值应力均高于自然裂隙岩石^[17]。无侧向约束的情况下, 在动荷载的作用下产生了沿裂隙方向的剪应力, 裂隙倾角由 0° 增至 45° 时, 岩石试件沿裂隙面的滑动破坏加剧^[25], 动态峰值应力逐渐减小。随着裂隙倾角的进一步增大, 沿裂隙面的剪切破坏逐渐减弱, 动态峰值应力增大, 45° 为裂隙岩石的优势破坏角。相较于本文试验, 外部水压力的存在为裂隙岩石提供侧向约束, 即使在 0 水压力工况下, 由裂隙岩石损伤扩容引起的被动水压力也能减缓岩石沿裂隙面的剪切破坏, 因此, 在所有水压力工况下, 随裂隙倾角的增大, 岩石动态峰值应力均呈逐渐增大的趋势。

分析认为, 裂隙的存在导致岩石呈现非均匀性, 破坏了岩石的完整性, 而裂隙倾角的增大将改变裂隙岩石的几何构型和应力波的传播路径, 从而影响动态峰值应力随裂隙倾角的演化规律。

从几何构型来看, 本试验所设置的裂隙长度为固定值, 随着裂隙倾角 α 的增加, 裂隙岩石径向连通率逐渐减小, 定义裂隙岩石径向连通率为

$$k = \frac{S_2}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (6)$$

式中: S_1 , S_3 为裂隙两侧岩桥区域的面积, S_2 为裂隙面在岩石径向的投影面积。计算结果如图 12 所示。

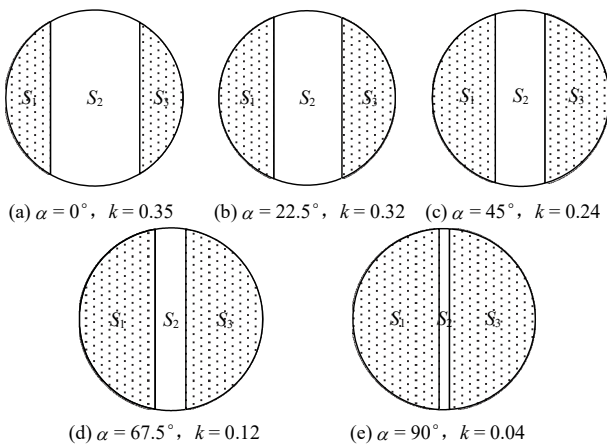


图 12 裂隙岩石径向连通率
Fig.12 Radial connectivity of fractured rock

由图 12 可以看出, 随着裂隙倾角 α 的增大, 岩桥面积 S_1 , S_3 增大, 使得承受垂直入射波的岩石横截面面积增加, 由裂隙面所产生的反射波场将减小。裂隙岩石更不易发生由反射波引起的张拉破坏, 这必然增大裂隙岩石抵抗冲击载荷的能力。

结合图 10 和 12 可知, 裂隙岩石动态峰值应力

随裂隙倾角的变化关系与随裂隙连通率的变化关系一致, 当裂隙倾角由 0° 增至 22.5° , 裂隙连通率仅降低 0.03, 对应的动态峰值应力也仅平均增长 7.66%。随着裂隙倾角的增大, 裂隙连通率的下降速率较快, 裂隙岩石抵抗冲击载荷的能力逐渐增强, 动态峰值应力则呈现快速上升的趋势。分析认为, 在相同的轴向静应力和水压力工况下, 随裂隙倾角的增大, 动态峰值应力先缓慢增加后快速上升的变化趋势受裂隙岩石径向连通率的影响。

从应力波的传播路径来看, 当裂隙倾角 $\alpha \neq 0$ 时, 即冲击载荷传播至裂隙处呈斜入射, 反射所产生的应力波场由反射 P 波和反射 SV 波叠加组成^[26]。入射 P 波(即冲击载荷)在裂隙面与水交界处产生反射 P 波和反射 SV 波, 由于 SV 波不能在水中传递, 裂隙内的高压水中只产生透射 P 波, 示意图如图 13 所示。由图可知, 多次透反射的叠加使得裂隙处全场应力状态异常复杂, 透射 P 波传播至裂隙的另一界面处, 会再次由于斜入射产生反射 P 波、透射 P 波, 图中没有显示这一过程, 仅考虑入射端一侧的透反射。

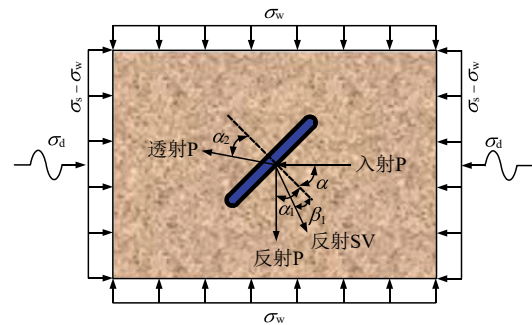
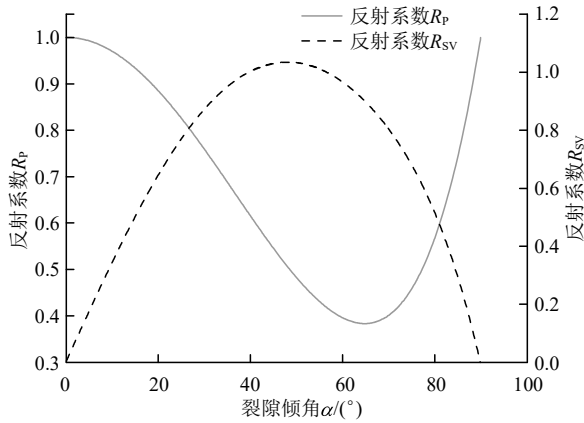


图 13 斜入射在裂隙处的透反射
Fig.13 Oblique incidence of reflection and transmission at the fracture

红砂岩属于典型的脆性材料, 其抗压能力最强, 抗剪能力次之, 抗拉能力最小。而抗剪和抗拉能力主要受反射 SV 波和反射 P 波的影响。在已知入射角 α 的条件下, 假设裂隙面为自由端面, 根据式(7)^[27]可以计算出裂隙面水岩交界处 P 波和 SV 波的反射系数:

$$\left. \begin{aligned} R_p &= \frac{4\sin\beta_1\cos(2\beta_1)\cos\alpha}{\tan\beta_1\sin^2(2\beta_1)\cot\alpha + \cos^2(2\beta_1)} \\ R_{sv} &= \frac{\tan\beta_1\tan^2(2\beta_1) - \tan\alpha}{\tan\beta_1\tan^2(2\beta_1) + \tan\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: α 为入射角, 也即裂隙倾角; β_1 为反射 SV 波与裂隙面法线方向的夹角。计算结果如图 14 所示。

图 14 反射系数 R_P 和 R_{SV} 随裂隙倾角的变化Fig.14 Variation of reflection coefficients R_P and R_{SV} with the fracture inclination angle

由图 14 可以看出,当裂隙倾角 $\alpha = 0^\circ$ 时,即入射 P 波正入射裂隙面时,不反射 SV 波 ($R_{SV} = 0$),只反射 P 波 ($R_P = 1$),这一结果是假设裂隙面没有填充压力水,裂隙面为自由端面计算得到的。事实上,裂隙面填充有压力水,入射 P 波还将发生透射,产生透射 P 波,因此,即使在正入射的情况下,反射系数 R_P 将小于 1,由于 SV 波不能在水中传递,SV 波的反射仍可以当作发生在自由端面上。

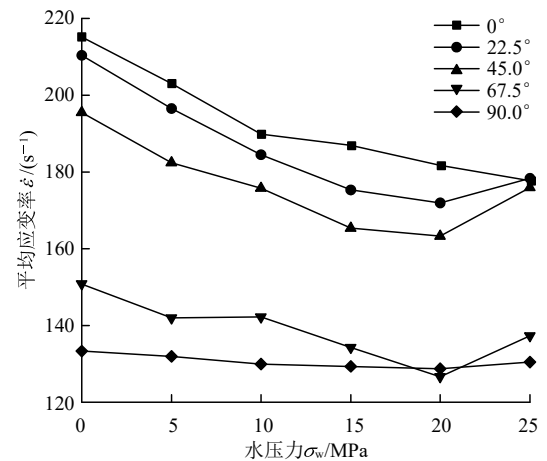
由图 14 还可以看出,裂隙倾角 α 由 0° 增大至 90° 过程中,反射 P 波先减小后增大;而反射 SV 波先增大后减小,且反射 SV 波的幅值变化幅度更大。这表明随着裂隙倾角的增大,裂隙岩石承受的张拉变形先减小后增大,剪切变形先增大后减小,二者耦合作用下,裂隙岩石张剪变形总体上呈先增大后减小的趋势。此外,岩石在外部水压力的约束作用下,抵消裂隙岩石的部分张剪变形;裂隙内部的压力水充当弱填充物使变形与岩石协调,缓解了岩石大变形的形成过程。这使得随裂隙倾角的增大,裂隙岩石抵抗冲击荷载的能力总体上呈先减小后增大的趋势,裂隙岩石动态峰值应力则整体呈现先缓慢增加后快速上升的趋势。综上所述,岩石动态峰值应力随裂隙倾角的演化规律,主要受裂隙岩石径向连通率和应力波斜入射的影响,水压力在这个过程中起到了关键的调控作用。

5 平均应变率的演化特性

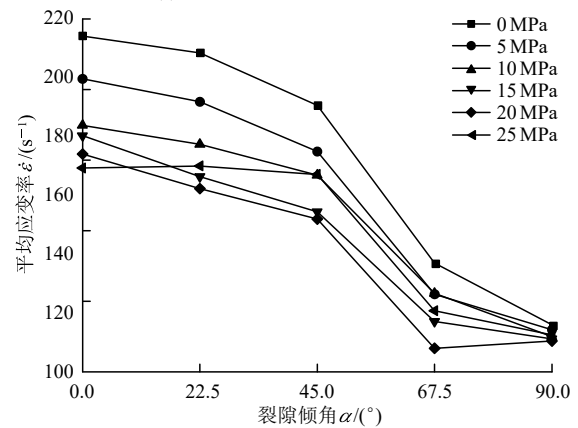
5.1 平均应变率与水压力和裂隙倾角的关系

平均应变率的大小是衡量裂隙岩石在受到动态冲击荷载下整体结构稳定性的关键指标。根据表 1 中的试验结果,平均应变率随水压力 and 裂隙倾角的变化

变化规律如图 15 所示。



(a) 平均应变率与水压力的关系



(b) 平均应变率与裂隙倾角的关系

图 15 裂隙岩石平均应变率与水压力和裂隙倾角的关系
Fig.15 Average strain rate of fractured rock as a function of water pressure and fracture inclination angle

从图 15(a)可以发现,水压力和裂隙倾角对裂隙岩石在固定冲击荷载作用下的平均应变率有较大的影响。当裂隙倾角相同时,随着水压力的增大,裂隙岩石平均应变率先逐渐减小。在当水压力超过 20 MPa 时,平均应变率出现不同程度的增大趋势,这表明当水压力由 0 逐渐增大时,对裂隙岩石的动态变形速率具有明显的抑制作用。当水压力达到一定值后,水压力对裂隙岩石的动态变形速率具有促进作用。裂隙岩石平均应变率随水压力的演化规律进一步印证了动态峰值应力随水压力的增大呈先增大后减小的趋势。由图 15(b)可以看出,当水压力相同时,随着裂隙倾角的增大,裂隙岩石平均应变率逐渐下降,表明裂隙倾角的增大对裂隙岩石动态变形速率有明显的抑制作用。

5.2 动态峰值应力与平均应变率的关系

裂隙岩石动态峰值应力与平均应变率之间的关系如图 16 所示。由图 16 可以看出,随平均应变率

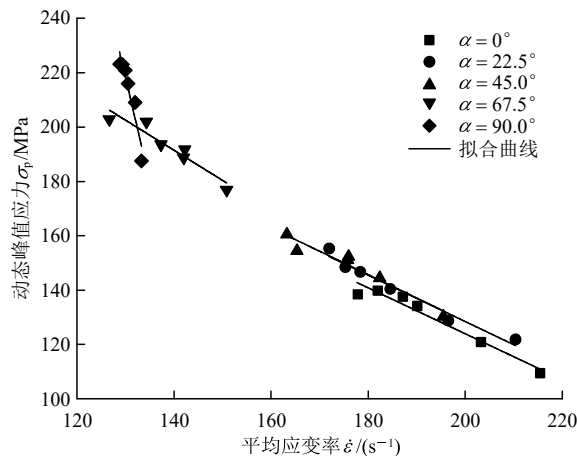


图 16 不同倾角下裂隙岩石动态峰值应力与平均应变率的关系

Fig.16 Relationship between dynamic peak stress and average strain rate in fractured rocks at different inclination angles

的增加,裂隙岩石动态峰值应力逐渐减小。这体现出了在固定冲击荷载作用下裂隙岩石动态峰值应力随应变率的劣化性能。在相同的冲击荷载作用下,由于不同水压力对裂隙岩石具有明显的强化作用,岩石动态峰值应力与平均应变率具有负相关性,即水压力越小,平均应变率越大,裂隙岩石的动态峰值应力越小。高水压高应力完整岩石试件在固定冲击荷载作用下也得到了相同的结论^[18]。

为定量分析裂隙岩石动态峰值应力与平均应变率之间的影响关系,运用式(8)对图 16 中的数据进行拟合:

$$\sigma_p = \gamma \dot{\epsilon} + \delta \quad (8)$$

式中: γ , δ 均为拟合系数。

对图 16 中不同倾角工况下裂隙岩石动态峰值应力和平均应变率的试验数据进行拟合,拟合结果如图 16 和表 3 所示。由图 16 和表 3 可以看出,拟合相关系数较高,不同裂隙倾角工况下,裂隙岩石动态峰值应力与平均应变率呈负线性关系。

表 3 裂隙岩石动态峰值应力与平均应变率之间的拟合结果

Table 3 Fitting results between the dynamic peak stress of fractured rock and the average strain rate

σ_s / MPa	裂隙倾角 / (°)	γ	δ	R^2
27	0	-0.84	292.93	0.95
	22.5	-0.85	299.06	0.96
	45.0	-0.86	300.59	0.92
	67.5	-1.11	346.44	0.88
	90.0	-7.59	1204.61	0.88

在冲击荷载作用下,裂隙岩石对应变率具有高度敏感性,也即应变率相关性,动态峰值应力随平均应变率的增加而增加,具有明显的正相关性^[28]。结合图 7 和 15 可以发现,随着水压力的逐渐增大,动态峰值应力呈现出先上升后下降的态势,而平均应变率则表现出先下降后上升的特征。这种变化趋势使得动态峰值应力与平均应变率之间呈负线性关系。这 2 个试验结果的区别在于,前者受变加载率所引起的应变率效应的影响,而后者主要受水压力的强化作用,所体现的是水压力对裂隙岩石动态强度的强化作用,而非应变率效应。

通过表 3 可以看出,动态峰值应力与平均应变率的线性拟合斜率 γ 的绝对值随倾角的增大逐渐增大,表明在固定的水压力变化范围内,随着裂隙倾角的增大,动态峰值应力与平均应变率的变化趋势越明显,即在相同的水压力和冲击荷载作用下,裂隙倾角的增大也有助于岩石抵抗外部冲击荷载。

6 结 论

(1) 在相同的冲击荷载下,水压力和裂隙倾角共同影响裂隙岩石动态应力-应变曲线形态,随着水压力和裂隙倾角的增大,裂隙岩石动态应力-应变曲线逐渐由 I 型向 II 型转变。曲线特征大致分为弹性变形阶段、裂纹快速扩展阶段和峰后破坏阶段。

(2) 当裂隙倾角确定时,随水压力的增大,裂隙岩石动态峰值应力先增大后小幅减小,裂隙岩石动态峰值应力与水压力之间服从良好的高斯函数分布。水压力对裂隙岩石动态峰值应力具有明显的强化作用。

(3) 当水压力确定时,随着裂隙倾角的增大,裂隙岩石动态峰值应力整体呈现出先缓慢增加后快速上升的趋势,变化趋势受裂隙岩石径向连通率和应力波斜入射的影响。裂隙倾角的增大对岩石动态峰值应力具有明显的强化作用。

(4) 当裂隙倾角确定时,随着水压力的增加,裂隙岩石平均应变率均呈现先减小后增大的趋势。当水压力确定时,随着裂隙倾角的增大,裂隙岩石平均应变率均逐渐减小。裂隙岩石动态峰值应力与平均应变率具有明显的负线性关系,随着平均应变率的增大,裂隙岩石动态峰值应力逐渐减小。

(5) 裂隙的存在破坏了岩石的完整性,在水压力作用下使岩石的有效应力降低且外部压力水向岩

石内部渗透加快,从而改变岩石应力状态和内部孔隙水压力。裂隙倾角的增大将改变裂隙岩石的几何构型和应力波的传播路径。裂隙岩石动态强度特性是水压力与裂隙倾角耦合作用的结果。

参考文献(References):

- [1] 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.(in Chinese)).
- [2] 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)).
- [3] LI D, GAO F, HAN Z, et al. Experimental evaluation on rock failure mechanism with combined flaws in a connected geometry under coupled static-dynamic loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 132: 106088.
- [4] MA Q, SU Q, YUAN P. Dynamic behavior and energy evolution characteristic of deep roadway sandstone containing weakly filled joint at various angles[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 8817107.
- [5] 袁 伟,李建春,李 星.非充填岩石节理的动态剪切力学行为实验研究进展[J].力学与实践,2023,45(5):960-971.(YUAN Wei, LI Jianchun, LI Xing. Progress of experimental study on dynamic shear behaviors of unfilled rock joints[J]. Mechanics in Engineering, 2023, 45(5): 960-971.(in Chinese)).
- [6] JIANG Y X, WU D, ZHAO X Z, et al. Experimental and numerical study on the damage evolution and acoustic emission multi-parameter responses of single flaw sandstone under uniaxial compression[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 133(PA): 133: 104535.
- [7] FENG P, XU Y, DAI F. Effects of dynamic strain rate on the energy dissipation and fragment characteristics of cross-fissured rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104600.
- [8] FENG P, ZHAO J, DAI F, et al. Mechanical behaviors of conjugate-flawed rocks subjected to coupled static-dynamic compression[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(5): 1765-1784.
- [9] 李地元,韩震宇,孙小磊,等.含预制裂隙大理岩 SHPB 动力学破坏特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(12): 2872-2883.(LI Diyu, HAN Zhenyu, SUN Xiaolei, et al. Characteristics of dynamic failure of marble with artificial flaws under split Hopkinson pressure bar tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2872-2883.(in Chinese)).
- [10] 李地元,胡楚维,朱泉企.预制裂隙花岗岩动静组合加载力学特性和破坏规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(6): 1081-1093.(LI Diyu, HU Chuwei, ZHU Quanqi. Experimental study on mechanical properties and failure laws of granite with an artificial flaw under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1081-1093.(in Chinese)).
- [11] LI X B, ZHOU T, LI D Y. Dynamic strength and fracturing behavior of single-flawed prismatic marble specimens under impact loading with a split-Hopkinson pressure bar[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 50: 29-44.
- [12] YOU W, DAI F, LIU Y, et al. Dynamic mechanical responses and failure characteristics of fractured rocks with hydrostatic confining pressures: An experimental study[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 122: 103570.
- [13] 方 杰,姚强岭,王伟男,等.含水率对泥质粉砂岩强度损伤及声发射特征影响的研究[J].煤炭学报,2018,43(增2):412-419.(FANG Jie, YAO Qiangling, WANG Weinan, et al. Experimental study on damage characteristics of siltstone under water action[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(Supp.2): 412-419.(in Chinese)).
- [14] 于超云,唐世斌,唐春安.含水率对红砂岩瞬时和蠕变力学性质影响的试验研究[J].煤炭学报,2019,44(2):473-481.(YU Chaoyun, TANG Shibin, TANG Chun'an. Experimental investigation on the effect of water content on the short-term and creep mechanical behaviors of red sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 473-481.(in Chinese)).
- [15] 邓华锋,齐 豫,李建林,等.水-岩作用下断续节理砂岩力学特性劣化机制[J].岩土工程学报,2021,43(4):634-643.(DENG Huafeng, QI Yu, LI Jianlin, et al. Degradation mechanism of intermittent jointed sandstone under water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 634-643.(in Chinese)).
- [16] 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.
- [17] 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):3131-3139.(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))
- [18] 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 on 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))
- [19] 金解放, 杨洪灏, 孙俊涛. 高水压对岩石动态能量耗散和破坏特性的影响[J]. 煤炭学报, 2023, 48(增 2): 563 - 574.(JIN Jiefang, YANG Honghao, SUN Juntao. Influence of high water pressure on dynamic energy dissipation and failure characteristics of rock[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(Supp.2): 563 - 574.(in Chinese))
- [20] 金解放, 方立兴, 王 宇, 等. 高水压高应力岩石动态响应特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(8): 1 821 - 1 838.(JIN Jiefang, FANG Lixing, WANG Yu, et al. Experimental study on dynamic response characteristics of rocks under high water pressure and high stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(8): 1 821 - 1 838.(in Chinese))
- [21] 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.
- [22] DING S, TANG S. Mechanical behavior evolution and failure characteristics of saturated and dry rocks under different water pressure environments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 178: 105777.
- [23] WASANTHA P L P, RANJITH P G. Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime[J]. Engineering Geology, 2014, 178: 91 - 101.
- [24] 金解放, 黄方博, 赵康艳, 等. 高水压高应力岩石声波传播频域特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(6): 1 316 - 1 334.(JIN Jiefang, HUANG Fangbo, ZHAO Kangyan, et al. Experimental study on acoustic propagation spectrum characteristics of rocks under high water pressure and high stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(6): 1 316 - 1 334.(in Chinese))
- [25] 潘 博, 汪旭光, 徐振洋, 等. 节理角度对岩石材料的动态响应影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 566 - 575.(PAN Bo, WANG Xuguang, XU Zhenyang. Research on the effect of joint angle on dynamic responses of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 566 - 575.(in Chinese))
- [26] 刘立波, 李建春, 李海波, 等. 应力波斜入射黏弹性节理的传播规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增 2): 3 593 - 3 598.(LIU Libo, LI Jianchun, LI Haibo, et al. Propagation law of oblique incidence of stress wave across a viscoelastic joint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.2): 3 593 - 3 598.(in Chinese))
- [27] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 311 - 317.(WANG Lili. Foundation of stress waves[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 311 - 317.(in Chinese))
- [28] YAN Z, DAI F, LIU Y, et al. Dynamic strength and cracking behaviors of single-flawed rock subjected to coupled static-dynamic compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 4 289 - 4 298.