

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0214

冲击损伤砂岩动静组合加载力学特性研究

闻 磊¹, 梁旭黎³, 冯文杰¹, 王 伟², 王 亮², 常江芳¹, 袁 维²

(1. 石家庄铁道大学 工程力学系, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;
3. 河北地质大学 勘查技术与工程学院, 河北 石家庄 050031)

摘 要: 利用霍布金森压杆试验装置对灰砂岩试样进行预加静载的循环冲击, 使试样产生初始损伤, 并分析此过程中试样的损伤演化规律。使用能够施加轴压的霍布金森压杆进行预损伤试样动静组合加载试验, 获得试样破坏模式、动态应力-应变关系等指标。基于应变等价原理分析预损伤试样动静组合加载条件下的总损伤变量, 建立相应的损伤演化方程及损伤本构关系, 并与完整试样进行对比。研究结果表明: 循环冲击过程中试样损伤变量分为快速上升、低速发展、高速发展 3 个阶段, 预加轴压越大低速发展阶段损伤变量平均值越小; 相同动静组合加载条件下预损伤试样动态强度较小, 完整试样应变率增强效应更加显著; 循环冲击预损伤变量 D_{01} 、预加静载损伤变量 D_{02} 对于应力-应变关系的影响是较为复杂的, D_{01} 、 D_{02} 值之和可能为负值; 建立的本构关系与试验曲线具有较好的一致性, 得到的总损伤变量曲线不仅能够解释试样宏观破坏与微观损伤过程的一致性, 并且能够反映循环冲击和预加静载两种因素对岩石总损伤发展的非线性影响。

关 键 词: 损伤变量; 循环冲击; 动静组合加载; 本构关系

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2020) 11—3540—13

An investigation of the mechanical properties of sandstone under coupled static and dynamic loading

WEN Lei¹, LIANG Xu-li³, FENG Wen-jie¹, WANG Wei², WANG Liang², CHANG Jiang-fang¹, YUAN Wei²

(1. Mechanics Engineering Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

3. School of Exploration Technology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: Through the application of SHPB (split Hopkinson pressure bar) test, this research firstly analyzed the law of damage under the cyclical impact on grey sandstone samples with the condition of static load. After that, to obtain the sample failure mode and speculate the relationship between dynamic stress and strain, the static-dynamic loading experiments on pre-damaged rock samples were also performed. Finally, based on the principle of strain equivalence, the total damage variable under the condition of static-dynamic loading was analyzed to derive the damage evolution equation to explain the relation of damage constitutive. Based on above tests, the research suggests: (1) the damage variable of rock sample can be divided into three stages during the process of cyclical impact, which are rapid increase, low-speed development and high-speed development, meanwhile, a higher axial pressure will lead to a lower damage variable in the stage of low-speed development; (2) compared with pre-damaged sample, the effect of strain rate enhancement on intact samples is more significant under the same condition; (3) the joint impact of pre-damaged variable (D_{01}) and static-load damage variable (D_{02}) might be negative, which therefore explained the fact that the dynamic strength increases with the static pressure under the condition of static-dynamic loading; (4) the constructed constitutive relation is also in perfect agreement with the curve of test value, which can in turn show a consistency between the macro- and micro- damage of the rock and then reflect the nonlinear influence of cyclical impact and static loading on total damage development.

Keywords: split Hopkinson pressure bar test; damage variable; cyclical impact; static-dynamic loading experiments; constitutive relation

1 引 言

矿山、隧道等工程围岩处于静载作用下, 同时

可能承受附近爆破施工、机械振动等动载的影响, 且动载常是多次或循环施加的^[1], 这些动载会使围岩宏观破坏前逐步产生损伤。这种预损伤岩石将继

收稿日期: 2020-01-09

修回日期: 2020-04-13

基金项目: 河北省自然科学基金 (No. E2018210066); 国家博士后面上基金 (No. 2018M631758); 国家自然科学基金 (No. 51979170)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2018210066), the Postdoctoral Science Foundation of China (2018M631758) and the National Natural Science Foundation of China (51979170).

第一作者简介: 闻磊, 男, 1983 年生, 博士, 副教授、硕士生导师, 主要从事岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: WL0921@126.com

通讯作者: 冯文杰, 男, 1967 年生, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事断裂力学方面的教学与研究工作。E-mail: wjfeng9999@126.com

续承受相应的静荷载,在某次较强的冲击荷载作用下发生宏观破坏。因此研究岩石在预加静载下的循环冲击损伤规律,以及这种预损伤岩石对应的动静组合加载力学特性具有重要的理论意义及工程应用价值。

岩石受到外力扰动时,内部细观结构会具有一定时变特性,表现为微裂纹产生和扩展,并且随着时间的增长逐渐发展^[2]。目前,诸多学者基于声发射、声波波速、弹性模量等指标研究了循环冲击作用下岩石的损伤演化规律。例如:樊秀峰等^[3]研究了砂岩波速与循环冲击次数的关系,发现随循环冲击次数的增加波速递减,且这种趋势可分为初始迅速衰减、稳定衰减、加速衰减 3 个阶段。陆华^[4]、梅年峰^[5]研究发现,循环加载条件下岩石损伤具有突变性,初次或前期冲击后的损伤程度最大,后续冲击损伤度逐渐减小,试样临界破坏时损伤变量值迅速变大。吕晓聪等^[6]利用霍布金森压杆系统(SHPB)对砂岩进行循环冲击试验,研究了围压对岩石损伤度的影响。Xiao 等^[7]依据循环静载荷作用下岩石的变形特性,提出倒 S 型损伤累积演化模型,研究了初始损伤、应力幅值、加载波形和频率等对岩石疲劳力学特性的影响。可见,人们对单纯循环冲击岩石力学性质变化及损伤程度变化的研究比较充分,对围压影响下循环冲击岩石损伤程度也有了初步研究,但对预加轴压条件下的循环冲击岩石损伤特性研究相对较少。

研究预静应力条件下岩石动静组合强度和变形性质,比单纯研究静载荷或动载荷对岩石的影响要更加合理^[8]。在 SHPB 的动静组合加载方面,自 1972 年 Christenson 等^[9]首次进行了围压下的岩石动载试验后,国内外学者不断改进 SHPB 装置进行了多次岩石三维冲击加载试验,并取得了一系列研究成果^[10-16]。刘少虹等^[13]采用 SHPB 试验设备针对煤岩进行了一维动静组合加载试验研究;闻磊等^[14]利用直径为 50 mm、能够施加轴压的 SHPB 设备,结合数值模拟研究了岩石冻融后预加静载下的动态力学性质。尹土兵^[15]进行了温度损伤后岩石的动静组合加载力学特性试验。杨福见等^[16]利用提出的静动-静组合加载模式,针对试样力学性质、渗透率、波速和声发射等,进行了一系列一维动静组合加载试验。目前,相关学者已进行了多种冻融、高温损伤后岩石的动静组合试验研究,但经历循环冲击损伤后的岩石动静组合试验极少,尤其针对循环冲击、预加静载、冲击动载损伤全过程的分析更少。

本文利用 50 mm 直径 SHPB 对岩石进行预加静

态轴压的循环冲击试验,使试样产生初始损伤,再次使用 SHPB 对循环冲击损伤试样进行动静组合加载,以获得试样破坏模式、动态应力-应变关系等指标,建立全过程损伤演化方程及损伤本构关系。本文研究可为揭示预损伤岩石的动静组合加载破坏机制提供帮助,对分析动载扰动围岩体的稳定性提供理论基础。

2 试验步骤及试样基本物理力学性质

2.1 试验方法

本文选用中细粒灰砂岩进行试验。试样尺寸为直径 50 mm,高度分别为 100、50 mm 的两种圆柱体。首先剔除含宏观裂纹的试样,再利用波速仪去除纵波波速差别较大的试样,完成试样筛选。高度为 100 mm 的试样共需 1 组,高度为 50 mm 的试样分为 12 组,每 3~4 块编为一组。加工完成的试样如图 1 所示。



图 1 灰砂岩试样

Fig.1 Samples of grey sandstone for tests

试验在石家庄铁道大学工程力学试验室进行。使用高精度电子天平、游标卡尺、电热鼓风干燥箱及真空饱水设备测试岩石干密度、饱和吸水率等基本物理指标。使用液压伺服刚性试验机进行单轴压缩试验。采用能够施加轴压的 SHPB 进行循环冲击试验及动静组合加载试验。SHPB 系统入射杆、透射杆、吸收杆直径均为 50 mm,长度分别为 3 000、2 000、1 000 mm,采用 40Cr 合金钢材质,密度为 7 810 kg/m³,纵波波速为 5 410 m/s,弹性模量为 210 GPa, SHPB 试验装置如图 2 所示。使用岩石声波仪(型号: HS-YS4A)测试试样循环冲击前后纵波波速及单轴加载过程中的波速, HY-YS4A 型岩石声波参数测试仪由微控制主机、高压激励、信号采集及多分量压电换能器等模块组成,频带宽、灵敏度高,可测试岩样纵波波速及单轴加载下的波速,单轴加载过程中的波速测试如图 3 所示。



图2 SHPB 试验装置

Fig.2 SHPB test equipment

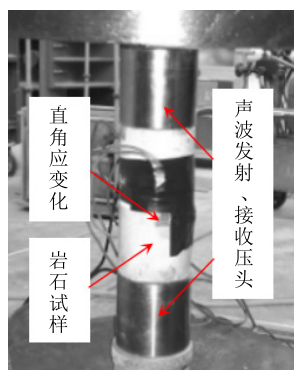


图3 加载过程中纵波波速测试

Fig.3 Wave velocity test during loading

干燥、饱水、单轴压缩试验过程参照相关规程^[17]进行, SHPB 试验参照国际岩石力学学会岩石动力学专业委员会编写的岩石动力学有关试验技术推荐的方法^[18]。主要试验步骤如下:

(1) 基本物理指标测试。将试样进行筛选、编号、分组, 用真空饱水设备强制饱水, 真空压力设定为 -0.1 MPa , 时间设定为 6 h , 之后浸泡 24 h , 称出试样饱水质量。将试样放入电热鼓风干燥箱(温度为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$)中烘干 48 h , 称量试样质量, 并测量试样尺寸。计算试样干密度和饱和吸水率。

(2) 循环冲击作用下试样波速演化测试。采用 SHPB 设备在不同轴压下(轴压 0 、 15 、 25 、 35 MPa)分别对 4 组高度为 50 mm 试样进行循环冲击, 每次冲击后测量试样纵波波速, 直至波速发生突然下降, 得到不同轴压下波速的完整变化趋势以及试样损伤低速发展阶段中间值对应的循环冲击次数 N' 值。

(3) 预损伤试样的制备。在不同轴压下(轴压 0 、 15 、 25 、 35 MPa)对 8 组高度为 50 mm 灰砂岩试样进行循环冲击, 调整子弹发射气压使单次冲击入射应力波为峰值 57.0 MPa 的半正弦波, 当冲击次数到达 N' 时停止冲击, 获得循环冲击后的损伤试样(以下简称“预损伤试样”)。至此, 共获得 8 组预损伤试样, 并保留 4 组高度为 50 mm 的无循环冲击损伤试样(以下简称“完整试样”)。

(4) 单轴压缩试验及加载过程中纵波波速测试。选用 1 组完整试样和 4 组预损伤试样(分别为 0 、 15 、 25 、 35 MPa 轴压下循环冲击损伤试样)进行单轴压缩试验, 同时采用 HY-YS4A 型岩石声波参数测试仪测量加载过程中的轴向波速, 得到完整试样和 4 组预损伤试样全应力-应变曲线及其与轴向波速的对应关系。

(5) 损伤试样和完整试样的动静组合加载试验。取预损伤试样 4 组、完整试样 4 组, 利用 SHPB 系统分别进行不同轴压(轴压与循环冲击施加轴压对应)、不同入射应力波(峰值应力分别为 95.6 、 118.6 、 141.3 、 178.3 MPa 的半正弦波)的动静组合加载试验, 选取的子弹与循环冲击试验相同, 获得试样破坏模式及动态应力-应变曲线。

2.2 静态物理力学参数测试结果

通过试验得到完整试样基本物理指标, 见表 1。预损伤试样、完整试样静态单轴压缩应力-应变曲线及对应的轴向纵波波速变化曲线见图 4。

表1 试样基本物理指标

Table 1 The basic physical parameters of testing samples

试样编号	干燥密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	干燥波速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	饱和吸水率 / %	试样编号	干燥密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	干燥波速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	饱和吸水率 / %
HS1-1	2.387	2 865	3.20	HS3-1	2.405	2 890	3.15
HS1-2	2.398	2 860	3.11	HS3-2	2.409	2 915	3.27
HS1-3	2.404	2 862	3.23	HS3-3	2.416	2 911	3.29
HS1-4	2.418	2 854	3.17	HS3-4	2.419	2 860	3.19
HS2-1	2.407	2 865	3.23	HS4-1	2.422	2 873	3.13
HS2-2	2.411	2 856	3.24	HS4-2	2.415	2 890	3.15
HS2-3	2.391	2 871	3.22	HS4-3	2.413	2 915	3.29
HS2-4	2.423	2 865	3.14	HS4-4	2.420	2 912	3.30

注: 试样平均值为干密度为 2.409 g/cm^3 ; 纵波波速为 2 880 m/s ; 饱和吸水率为 3.21% 。

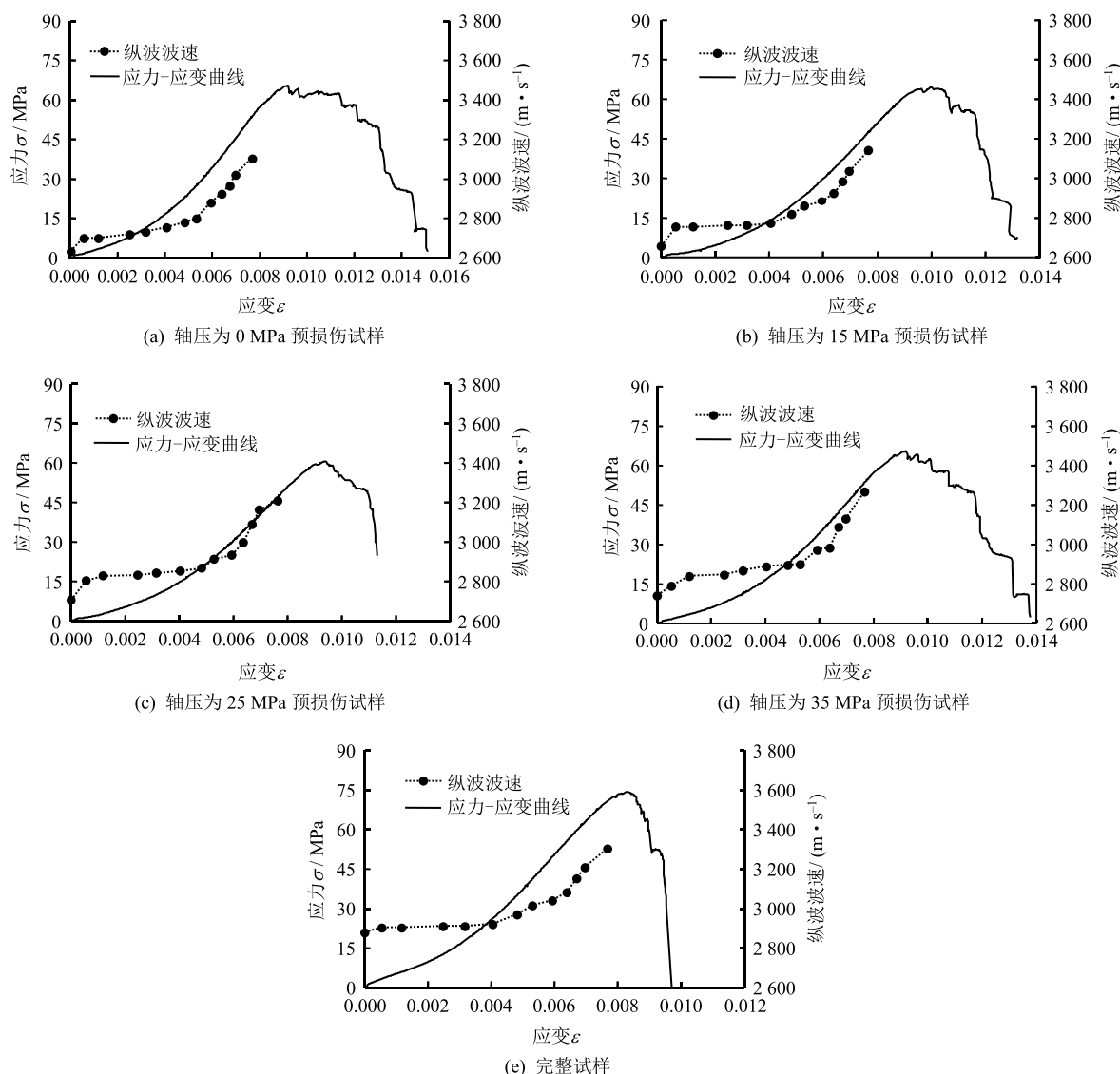


图 4 应力-应变曲线及对应的轴向纵波波速
Fig.4 Curves of stress-strain and wave velocity values

完整试样单轴抗压强度为 74.38 MPa, 4 类预损伤试样平均强度为 62.59 MPa。图 4 所示几类试样的应力-应变曲线均可分为压密阶段、弹性变形阶段、裂纹扩展阶段和破坏阶段。预损伤试样压密阶段明显变长, 主要因为循环冲击导致了试样内部微裂隙发展, 相比完整试样, 预损伤试样塑形更大, 静态抗压强度更低。

岩石内部裂隙及所受应力状态都会影响试样波速^[19], 诸多研究结果表明, 在单轴加载各个阶段纵波波速变化形态不同, 但加载初期均呈逐渐增大趋势^[20-21]。本文沿试样加载方向进行波速测试, 波速测试过程仅限于压密阶段和弹性变形阶段以内, 并且基本限于起裂应力门槛值^[22]以内, 未进行应力峰值附近及峰后阶段的波速测量。在压密阶段及线弹性阶段以内, 波速随应力增加逐渐增大, 这也与其他学者研究结果相似^[23-24]。图 4 所示几类试样纵波

波速对应力增加的敏感程度大致相近, 但预损伤试样初始波速低于完整试样, 预加轴压越大, 相同应变对应的波速越高。

试样进入压密阶段, 波速略微增大, 这主要是由于试样内部微裂隙初步闭合的结果, 几类试样波速增加幅度分布在 22~100 m/s, 完整试样增加幅度最小。此阶段预损伤试样波速有一个较明显的增大过程, 这主要是由于预损伤后试样内部微裂纹显著增多, 不仅有平行轴向的裂纹, 也有倾斜方向的裂纹扩展(存在轴压时此类裂纹较多)。当试样进入线弹性阶段, 应力有所增加时, 纵波波速仅产生较小幅度上升, 这是因为本文岩样是典型的脆性岩石, 孔隙率较低, 孔隙基本压密后较低的应力水平无法较大改变其内部结构。应力继续增大后, 纵波速度出现较大幅度的增长, 这种现象主要与岩石裂纹进一步闭合, 尤其是岩石内部孔洞、结构崩塌, 试样

内部变的更加密实有关^[20]。

3 循环冲击作用下试样损伤演化特征

通常采用密度、弹性模量、纵波波速等宏观特征参数表征岩石损伤程度^[25]。由于岩石超声波速与其密度、内部微裂隙扩展程度等因素紧密相关,因此本文采用纵波波速表示试件损伤程度。加载过程中,试件轴向波速与横向波速整体变化形态有所差别^[23],但前期均会出现波速增大的现象,综合考虑试验加载方式、分析重点等因素,本文将关注轴向波速的变化。

波速表征的损伤变量 D_n 表达式为^[26-27]

$$D_n = 1 - \left(\frac{V_n}{V_0} \right)^2 \quad (1)$$

式中: V_0 为初始波速; V_n 为损伤后波速。

利用能够施加轴压的 SHPB 系统进行循环冲击,轴压分别设定为 0、15、25、35 MPa,分别为单轴压缩强度的 0%、20%、33%、47%。数次冲击后试样波速突然下降。每冲击一次后测量试样纵波波速,得到不同冲击次数后的波速 V_n 。依据式(1)得到不同冲击次数后损伤变量 D_n 。不同轴压下,试样损伤变量与循环冲击次数关系见图 5。

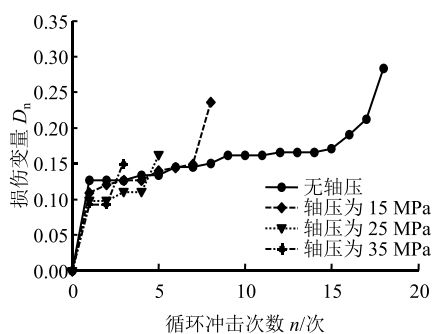


图 5 损伤变量随冲击次数变化曲线

Fig.5 Relationship between damage variables and impact number

初始静载的存在改变了试样内部原有微裂纹闭合程度,在相同应力波作用下形成不同的波阻抗值,冲击过程中应力波在微裂纹处形成不同的作用形式,导致试样内部微裂纹扩展程度不同^[28],进而使试样产生不同程度的损伤。可选用 Logistic 函数的逆函数表征岩石循环冲击损伤 D_{01} 变化^[29]:

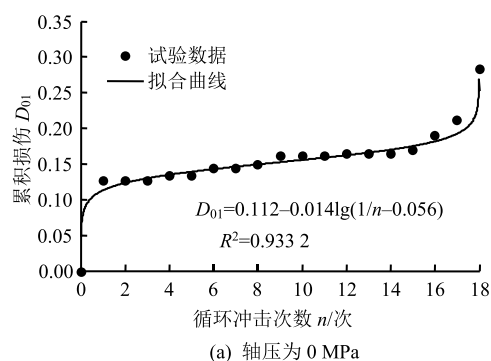
$$D_{01} = a_0 - \beta \ln \left(\frac{k}{n} - \eta \right) \quad (2)$$

式中: a_0 为损伤演化模型曲线中心值,表示初始阶段累积损伤的大小; β 为裂纹低速发展阶段曲线斜

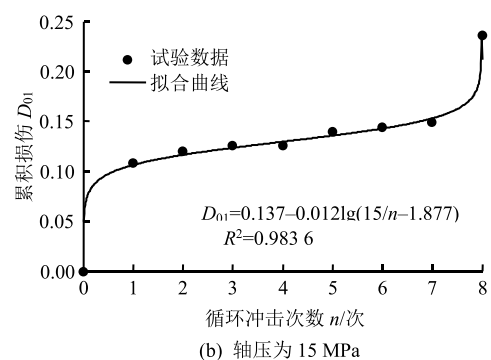
率的大小; k 为轴向静载值; η 为裂纹加速发展阶段损伤累积速率因子,取值范围为 $(0, k/N)$, N 为总循环冲击次数。

依据循环冲击波速测试结果,利用式(2)得到不同轴压下岩石循环冲击损伤变化趋势,如图 6 所示。

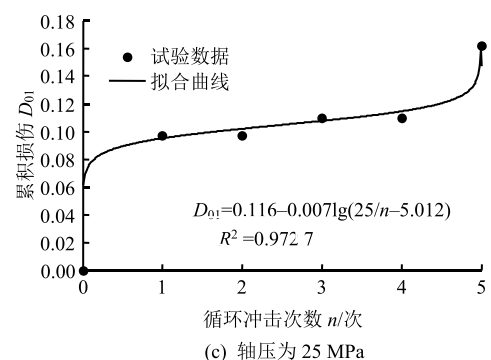
随循环冲击次数增加,纵波波速明显下降。不同轴压条件下,初次冲击均使损伤变量值急剧上升,



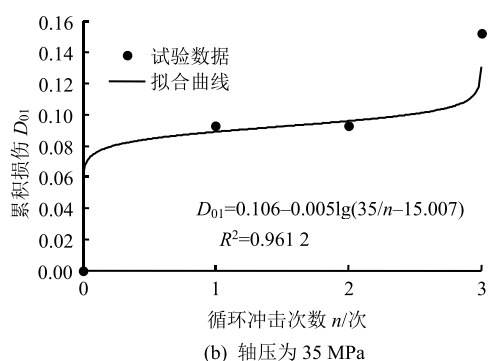
(a) 轴压为 0 MPa



(b) 轴压为 15 MPa



(c) 轴压为 25 MPa



(d) 轴压为 35 MPa

图 6 不同轴压下岩石循环冲击损伤变化趋势
Fig.6 Trend of damage under different axial compression

中间数次冲击引起的损伤变化趋于平缓。随轴压的增加, 试样达到宏观破坏所经历的循环冲击次数逐渐减小, 轴压为 0、15、25、35 MPa 时, 分别进行 18 次、8 次、5 次、3 次循环冲击后波速陡然下降, 预示试样将发生宏观破坏。损伤变量值变化趋势总体可分为 3 个阶段: 快速上升阶段、平缓发展阶段、急速上升阶段。不同轴压下, 平缓发展阶段损伤变量值变化均较小, 轴压为 0 MPa 时, D_n 由 0.127 变化到 0.171, 平均值为 0.150; 轴压为 15 MPa 时, D_n 由 0.109 变化到 0.150, 平均值为 0.131; 轴压为 25 MPa 时, D_n 由 0.097 变化到 0.110, 平均值为 0.104; 轴压为 35 MPa 时, D_n 平均值为 0.093。随轴压增大, 首次冲击产生的损伤与平缓发展阶段 D_n 平均值均有所减小。

4 动静组合加载试样力学特性分析

4.1 动静组合加载破碎模式

以处于损伤平缓发展阶段的岩石(预损伤试样)作为研究对象, 设定对应的轴压, 进行一次冲击破

坏, 即进行预损伤试样的动静组合加载试验。动静组合加载试验直接采集到的典型入射波(i)、透射波(t)、反射波(r)如图 7 所示, 并且入射波、反射波叠加与透射波吻合较好, 表明本文试验满足应力均匀性假设。不同入射波(峰值应力分别为 95.6、118.6、141.3、178.3 MPa 的半正弦波)在轴压为 0、35 MPa 条件下预损伤试样、完整试样破坏模式如图 8 所示。

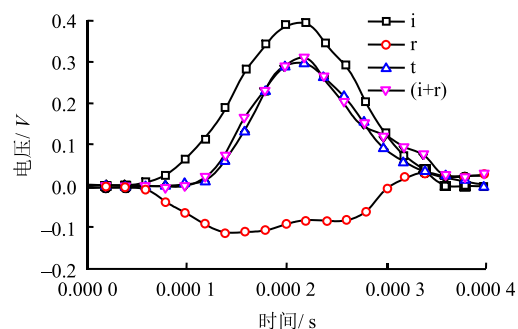


图 7 典型入射波(i)、反射波(r)、透射波(t)
Fig.7 Curves of typical incident wave (i), reflected wave (r) and transmitted waves (t)



图 8 不同入射波条件下试样破坏模式照片

Fig.8 Photos of damaged samples under different incident waves

随入射波峰值增大试样更加破碎,轴压为 0 MPa 时表现为拉伸破坏模式。轴压影响下杆件、试件间的摩阻力不能忽略,轴压作用下试样一般为压(拉)剪破坏模式。入射波、轴压相同时,预损伤试样破碎程度大于完整试样。入射波相同,随轴压不同完整和预损伤试样破碎程度不同,0 MPa 轴压时预损伤试样破碎程度相对更高。

4.2 动静组合加载强度分析

通过动静组合试验得到不同轴压、不同峰值入射波时预损伤试样和完整试样的动态应力-应变曲线。以 0、35 MPa 轴压的试验结果为例进行分析,如图 9 所示。

动静组合加载作用下两类试样应力-应变曲线均无明显压密阶段,主要是在冲击载荷作用下试样内部微裂隙来不及闭合以及岩石晶体表现出较大惯性所致,线弹性阶段斜率(弹性模量)与撞击速度没有明显的相关性^[30]。轴压对峰值及峰后形态有较大影响,峰后(破坏阶段)曲线分为 3 种类型,即“峰后塑性”、“应力跌落”、“应变回弹”。轴压在一定应力水平以内^[31]作用时,岩样内部微裂隙闭合,损伤变量减小,相对于无轴压时弹性模量增大。相同荷载条件下,预损伤试样强度较小,塑性较大。

不同轴压作用下,预损伤、完整试样动态抗压强度与应变率关系如图 10 所示。

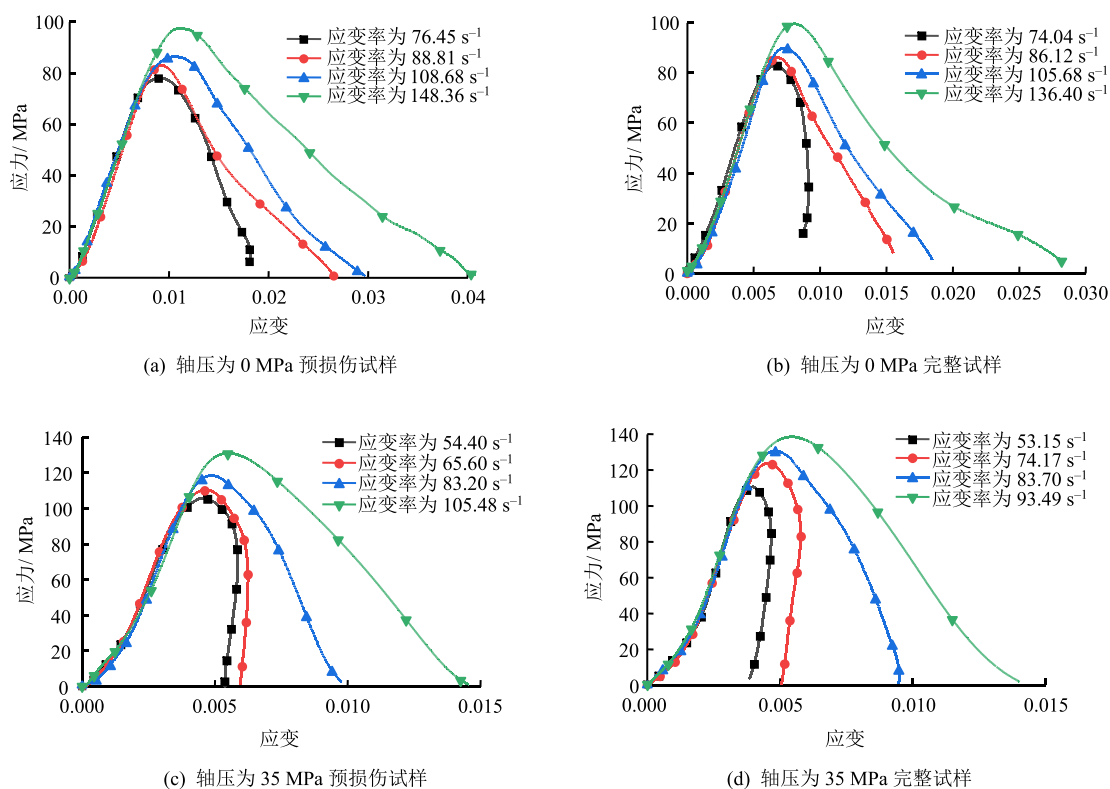


图 9 典型应力-应变曲线
Fig.9 Curves of typical stress-strain

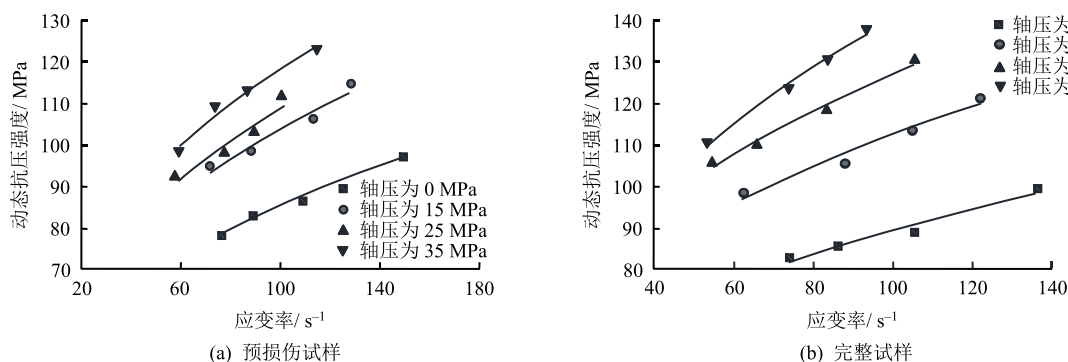


图 10 动态抗压强度与应变率关系
Fig.10 Relationship between dynamic strength and strain rate

预损伤和完整试样均表现出较明显的应变率效应，动态抗压强度随应变率的增加而增大。动态抗压强度和应变率关系可用指数函数形式表示为

$$\sigma_d = a\dot{\varepsilon}^b \quad (3)$$

式中： σ_d 为岩石动态抗压强度（MPa）； $\dot{\varepsilon}$ 为应变率（1/s）。不同条件下，参数 a 、 b 取值见表 2。

表 2 参数 a 、 b 取值
Table 2 Values of parameters a and b

试样类型	轴压 / MPa	参数 a 值	参数 b 值
预损伤试样	0	19.50	0.290
	15	23.36	0.320
	25	25.14	0.325
	35	22.05	0.341
完整试样	0	22.64	0.299
	15	26.54	0.318
	25	28.87	0.326
	35	23.75	0.386

参数 b 取值均为 0.3 左右，与其他学者结论一致^[32]，完整岩石应变率增强效应更加显著。本文试验中，相同应变率下，预损伤、完整试样动态抗压强度随轴压增加而增大，35 MPa 轴压未超过静态强度的 50%，因此，未出现强度随轴压增大而减小的情况，可能轴压超过静载强度约 70%，动态抗压强度才会出现下降^[31, 33-34]。

岩石是各种矿物颗粒相互黏结或胶结在一起的聚合体，当其受到冲击动载时，矿物颗粒间的连接（黏结）力被削弱，致使岩样的黏聚力及内摩擦角有所下降，引起力学特性劣化。随着循环冲击次数的增加，岩样内部随机产生的损伤场或薄弱面逐渐增多，这种变化即使处在弹性极限范围内也是不可恢复的^[2]。循环冲击造成了岩石内部微裂隙的发展，岩石的冲击破坏是由裂纹的扩展所致，裂纹产生所需的能量远高于裂纹扩展所需的能量。预损伤试样与完整试样的动力学特性不同，正是试样内部微裂纹产生和扩展的反映，预损伤试样动态强度和吸能能力明显降低。岩石动态强度随应变率的提高而增加，但由于循环冲击预损伤效果的影响，应变率增强效应略微减弱。

5 一维静载作用下预损伤试样动态本构模型

5.1 本构模型建立及验证

根据 Lemaitre^[35]提出的应变等价原理及张全胜等^[36]推广的应变等价原理，得到循环冲击与动静组

合加载作用后的岩石总损伤变量为

$$D_1 = D + D_0 - DD_0 \quad (4)$$

式中： D_1 为岩石循环冲击和动静组合总损伤变量； D 为冲击动载造成的损伤变量； D_0 为冲击动载作用前岩石的初始损伤，包括循环冲击损伤 D_{01} 、动静组合试验的预加静载损伤 D_{02} ，即 $D_0 = D_{01} + D_{02}$ 。

岩石强度服从 Weibull 统计分布，岩石的受荷损伤因子表示为^[37]

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (5)$$

式中： m 为形状参数； α 为材料参数。

将式（5）代入式（4）得到总损伤演化方程为

$$D_1 = 1 - (1 - D_0) \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (6)$$

即，

$$D_1 = 1 - (1 - D_{01} - D_{02}) \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (7)$$

岩石本构方程可表示为

$$\sigma = E_0(1 - D_1)\varepsilon \quad (8)$$

式中： E_0 为动态弹性模量。

将式（7）代入式（8）得

$$\sigma = E_0\varepsilon(1 - D_{01} - D_{02}) \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (9)$$

将式（2）代入式（9）得

$$\sigma = E_0\varepsilon \left[1 - D_{02} - a_0 + \beta \ln\left(\frac{k}{n} - \eta\right)\right] \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (10)$$

式（10）即为轴压作用下预损伤试样动态本构方程。

参照文献^[37]的思路，结合动态应力-应变曲线特点，式（10）满足以下 4 个条件：

$$\textcircled{1} \varepsilon = 0 \text{ 时, } \sigma = 0$$

$$\textcircled{2} \varepsilon = 0 \text{ 时, } \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E$$

$$\textcircled{3} \varepsilon = \varepsilon_{\max} \text{ 时, } \sigma = \sigma_{\max}$$

$$\textcircled{4} \varepsilon = \varepsilon_{\max} \text{ 时, } \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$$

由于冲击应力-应变曲线基本无压密阶段，因此，条件②符合动态应力-应变曲线特征。

式 (9) 两边分别对应变求导可得

$$d\sigma/d\varepsilon = E_0(1-D_{01}-D_{02})\exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right]\left[1-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (11)$$

由条件②得

$$E = E_0(1-D_{01}-D_{02}) \quad (12)$$

因此, 可知式 (9)、(10) 中 E_0 为完整试样动态弹性模量。

由条件③和式 (9) 得

$$\frac{\sigma_{\max}}{E_0(1-D_{01}-D_{02})\varepsilon_{\max}} = \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{\alpha}\right)^m\right] \quad (13)$$

等式两边各取两次对数得

$$\ln\left[\ln\frac{E_0(1-D_{01}-D_{02})\varepsilon_{\max}}{\sigma_{\max}}\right] = m\ln\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{\alpha}\right) \quad (14)$$

根据条件④和式 (11) 得

$$\left[1-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right] = 0 \quad (15)$$

即

$$\frac{1}{m} = \left(\frac{\varepsilon_{\max}}{\alpha}\right)^m \quad (16)$$

两边取对数得

$$\ln\left(\frac{1}{m}\right) = m\ln\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{\alpha}\right) \quad (17)$$

对比式 (14)、(17), 两式左边相等, 即

$$m = \frac{1}{\ln\left(\frac{E_0(1-D_{01}-D_{02})\varepsilon_{\max}}{\sigma_{\max}}\right)} \quad (18)$$

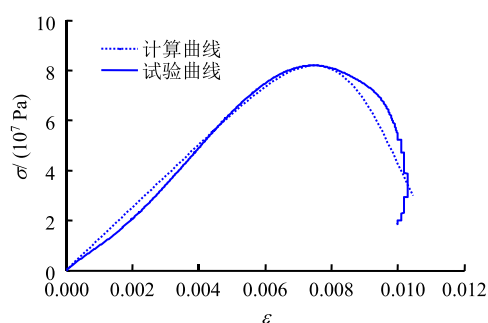
将式 (18) 代入式 (16), 得

$$a = \frac{\varepsilon_{\max}}{(1/m)^{\frac{1}{m}}} \quad (19)$$

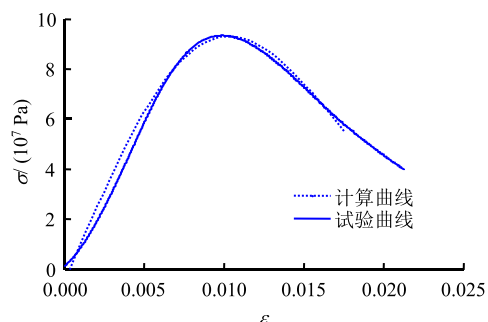
式 (10) 中包含 n 、 a_0 、 β 、 k 、 η 、 α 、 m 等 7 个参数, 可通过以上分析全部得出。本构关系表达式中包含了初始损伤参数 $D_0 = D_{01} + D_{02}$, 并且 D_0 可以为负值。其中, D_{01} 为循环冲击损伤参数, 一般为正值, D_{02} 为轴压损伤参数, 可以为正值, 也可以为负值。综合众多岩石动静组合试验研究结果^[8, 31]可知, 若轴压未超过某个门槛值, 则 D_{02} 取为负值 (本文试验预加轴压均未超过该门槛值), 若超过该门槛值, 则 D_{02} 取为正值, 这也是随轴压增大动态抗压强度先增大后减小的主要原因之一。显

然, 仅 D_{01} 、 D_{02} 值的改变直接影响应力-应变曲线的峰前、峰后斜率, 但 D_{01} 、 D_{02} 值的变化也会同时会造成 $\sigma_{\max}$ 及 $\varepsilon_{\max}$ 值的变化, 因此 D_{01} 、 D_{02} 值对于应力-应变关系的影响是较为复杂的。

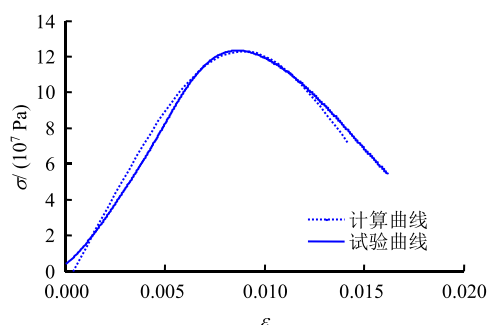
取不同轴压、不同峰值入射波、完整-预损伤试样典型试验数据对本构模型进行验证, 计算曲线与试验数据吻合, 见图 11。基于试验过程及相关控制因素考虑, 本文建立的本构关系仅适用于预加轴压在弹性变形阶段以内 (或单轴试验起裂应力门槛值以内) 的情况。



(a) 0 MPa 轴压-完整试样-峰值 95.6 MPa 入射波



(b) 15 MPa 轴压-预损伤试样-峰值 118.6 MPa 入射波



(c) 35 MPa 轴压-预损伤试样-峰值 141.3 MPa 入射波

图 11 计算曲线与试验数据对比图

Fig.11 Comparison between stress-strain measured and fitting curves

5.2 动静组合加载损伤力学特性分析

SHPB 试验中预加静载后岩石波速可由图 4 获得, 依据式 (1) 得到预加静载损伤变量 D_{02} 值见表 3。

表 3 预加静载对应的波速及 D_{02} 值
Table 3 Values of wave velocity and D_{02}

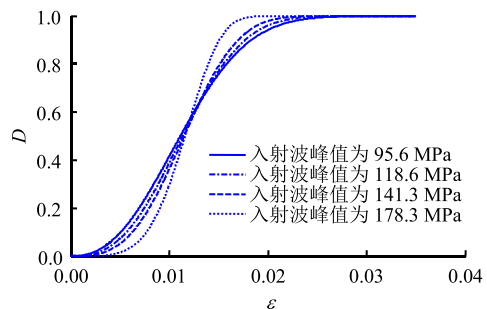
试样 种类	轴压 / MPa	单轴试验初始波速 / (m · s ⁻¹)	预加轴力对应波速 / (m · s ⁻¹)	D_{02} 值
预损伤 试样	0	2 635	2 635	0.000
	15	2 654	2 725	-0.054
	35	2 703	3 011	-0.241
	45	2 742	3 304	-0.452
完整 试样	0	2 880	2 880	0.000
	15	2 880	3 023	-0.102
	35	2 880	3 213	-0.245
	45	2 880	3 315	-0.325

动静组合加载岩石损伤变量 D_{01} 、 D_{02} 值见表 4。根据表 4 及应力-应变曲线的 $\sigma_{\max}$ 及 $\varepsilon_{\max}$ 值可得到动静组合加载条件下损伤变量发展趋势（见图 12）及典型完整试样与预损伤试样损伤变量对比（见图 13）。

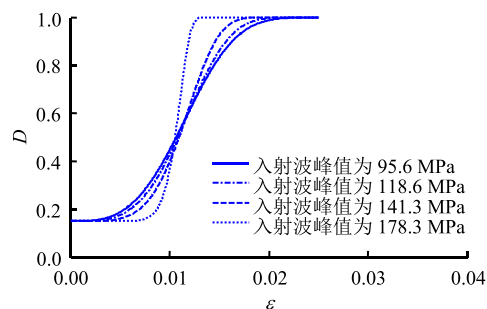
表 4 动静组合加载岩石损伤变量 D_{01} 、 D_{02} 结果
Table 4 Values of D_{01} and D_{02}

轴压 / MPa	预损伤试样			完整试样		
	D_{01}	D_{02}	D_0	D_{01}	D_{02}	D_0
0	0.150	0.000	0.150	0.000	0.000	0.000
15	0.130	-0.054	0.076	0.000	-0.102	-0.102
25	0.110	-0.172	-0.062	0.000	-0.175	-0.175
35	0.100	-0.352	-0.251	0.000	-0.253	-0.253

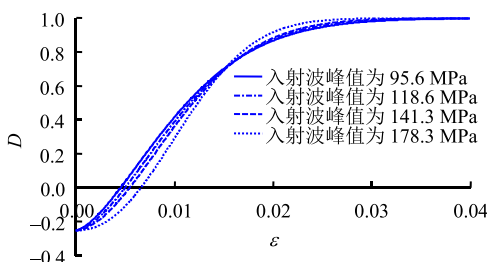
损伤演化曲线可以反映岩石的细观力学响应，并且与试件宏观破坏、变形过程具有统一性。总体来说，随着应变的增大损伤变量逐渐增加。损伤演化曲线均呈“S”型，分为 3 个阶段：①当应变为 0 时，完整试样初始损伤变量为 0，且损伤变量初始阶段几乎无增长。这是由于处于初始弹性阶段时加载应力远小于试样弹性极限，此时试件几乎没有损伤，仅产生弹性应变。②损伤演化曲线的上凹段对应塑性变形阶段，损伤变量迅速上升，裂隙扩展速度加快，试样开始产生塑性屈服。随着应变的增大，试件内部微裂缝继续扩展，损伤变量不断增加，当裂缝扩展达到临界破坏状态时，即对应峰值应力时，损伤变量增加速度最快，并且出现不稳定裂缝扩展。损伤变量曲线凹凸性拐点对应试件动态抗压强度。③损伤演化曲线的上凸段对应应变软化阶段，曲线斜率逐渐变小，此时试件内部裂缝扩展加剧，最终造成试件宏观断裂，此时损伤变量趋于 1。随着入射波峰值的增大，损伤曲线的最大斜率，即拐点处曲线斜率增大，说明动态抗压强度对应的损伤随入射波峰值增大而增加，宏观表现为岩石更为破碎。



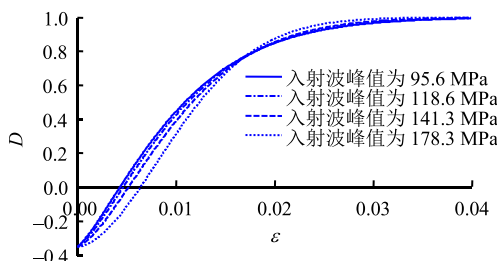
(a) 0 MPa 轴压-完整试样



(b) 0 MPa 轴压-预损伤试样



(c) 35 MPa 轴压-完整试样



(d) 35 MPa 轴压-预损伤试样

图 12 不同入射波条件下的损伤变量发展趋势
Fig.12 Curves of damage value under different incident plane waves

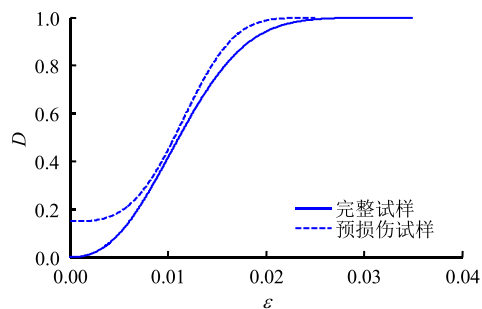


图 13 0 MPa 轴压-峰值 95.6 MPa 入射波完整试样与预损伤试样损伤变量对比
Fig.13 Damage values comparison between the pre-damaged and intact samples

预损伤试样的损伤演化过程与完整岩石有明显不同。预损伤试样初始损伤变量不为 0, 表明动载之前已经经历了一定程度的损伤劣化。相对完整岩石, 预损伤试样在相同应变处所对应的损伤变量值略大, 可反映出预制损伤岩石内部劣化程度较高, 宏观上表现出预制损伤试样刚度及强度的减小。同时, 相同损伤程度时, 预损伤岩石的应变较小, 即预损伤岩石损伤累积的速度较快, 岩石的塑性特性较弱。

动静组合加载过程中, 预加轴压后, 岩石损伤变量初始值可能出现负值, 此时损伤变量曲线初期水平段很短, 很快进入损伤的快速增长阶段, 表明试样在动静组合加载过程中初始线弹性阶段较短, 在较小的动应力水平下试样内部微裂纹便开始扩展, 之后试样损伤程度逐渐加剧到达曲线拐点。相同入射波、相同静载条件下预损伤试样损伤变量曲线最大斜率较大, 试样破碎程度将会较高。35 MPa 轴压时, 预损伤试样损伤变量为 0.34 时对应峰值应力, 之后应变增长比无轴压时较多, 表明试样塑性较大。轴压在某一数值以内时, 随着轴压增大动态强度升高, 轴压抑制了垂直于轴向的裂隙扩张, 并使试样内部原有裂隙处于闭合状态, 微裂隙闭合及孔隙进一步压密、坍塌对波阻抗产生影响, 从而改变岩石轴压作用下的动态强度。

6 结 论

(1) 单轴加载过程中, 纵波波速变化与应力密切相关, 在压密阶段及线弹性阶段以内, 波速随应力增加逐渐增大, 压密阶段预损伤试件波速有一个较明显的增大过程。预损伤试件初始波速低于完整试件, 预加轴压越大, 相同应变对应的波速越高。

(2) 循环冲击过程中, 初始静载不同试样产生损伤程度不同, 随轴压增大, 首次冲击产生的损伤与平稳发展阶段损伤变量平均值均有所减小。可选用 Logistic 函数的逆函数表征岩石循环冲击损伤变化, 总体分为 3 个阶段: 快速上升阶段、平缓发展阶段、急速上升阶段。

(3) 预损伤和完整试样均表现出较强的应变率效应, 动态抗压强度随应变率的增加而增大, 动态抗压强度和应变率关系可采用指数函数形式 $\sigma_d = a\dot{\epsilon}^b$ 表示, 并且参数 b 取值为 0.3 左右, 完整岩石应变率增强效应更加显著。

(4) 动静组合加载, 入射波、轴压相同时, 预损伤试样破碎程度大于完整试样。入射波相同, 随轴压不同完整和预损伤试样破碎程度不同, 0 MPa

轴压时预损伤试样破碎程度相对更高, 轴压的存在可使弹性模量增大。相同荷载条件下, 预损伤试样强度较小, 塑性较大。

(5) 建立的包含预损伤、静载损伤变量的本构关系与试验曲线具有较好的一致性, 得到的总损伤变量曲线不仅能够解释岩石宏观破坏与细观损伤过程的一致性, 并且能够反映循环冲击和预加静载两种因素对岩石总损伤发展的非线性影响, 本文建立的本构关系仅适用于预加轴压在单轴试验起裂应力门槛值以内的情况。本构关系中 D_{01} 、 D_{02} 值对于应力-应变关系的影响是较为复杂的, 初始损伤参数 D_0 可以为负值, 这也是随轴压增大动态强度增大的主要原因之一。

参 考 文 献

- [1] LI H B, XIA X, LI J C, et al. Rock damage control in bedrock blasting excavation for a nuclear power plant[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(2): 210-218.
- [2] 邓红卫, 刘传举, 柯波, 等. 循环动力扰动下花岗岩细观损伤特性试验研究[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(11): 1634-1639.
DENG Hong-wei, LIU Chuan-ju, KE Bo, et al. Experimental study on microscopic damage characteristics of granite under cyclic dynamic disturbances[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(11): 1634-1639.
- [3] 樊秀峰, 简文彬. 砂岩疲劳特性的超声波速法试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 557-563.
FAN Xiu-feng, JIAN Wen-bin. Experimental research on fatigue characteristics of sandstone using ultrasonic wave velocity method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 557-563.
- [4] 陆华. 冲击荷载下红砂岩流固耦合的动力响应及损伤效应研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
LU Hua. Research on dynamic responses and damage effect of red sandstone with fluid-solid coupling under impact loading[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.
- [5] 梅年峰. 循环动荷载作用下脆性岩石疲劳损伤力学特性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
MEI Nian-feng. Research on fatigue damage and mechanical characteristics of brittle rock under cycle dynamic loading[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [6] 吕晓聪, 许金余, 葛洪海, 等. 围压对砂岩动态冲击力学性能的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(1): 193-201.

- LÜ Xiao-cong, XU Jin-yu, GE Hong-hai, et al. Effects of confining pressure on mechanical behaviors of sandstone under dynamic impact loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 193-201.
- [7] XIAO J Q, DING D X, XU G, et al. Inverted S-shaped model for nonlinear fatigue damage of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(3): 643-648.
- [8] 宫凤强. 动静组合加载下岩石力学特性和动态强度准则的试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- GONG Feng-qiang. Experimental study of rock mechanical properties under coupled static-dynamic loads and dynamic strength criterion[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [9] CHRISTENSON R J, SWANSON S R, BROWN W S. Split-Hopkinson-bar tests on rock under confining pressure[J]. **Experimental Mechanics**, 1972, 12 (11): 508-513.
- [10] 周子龙. 岩石动静组合加载试验与力学特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- ZHOU Zi-long. Study on experimental and mechanical behaviors of rock under static-dynamic coupling loads[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [11] 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.
- [12] 李夕兵, 左宇军, 马春德. 中应变率下动静组合加载岩石的本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 865-874.
- LI Xi-bing, ZUO Yu-jun, MA Chun-de. Constitutive model of rock under coupled static-dynamic loading with intermediate strain rate[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 865-874.
- [13] 刘少虹, 秦子晗, 娄金福. 一维动静加载下组合煤岩动态破坏特性的试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2064-2075.
- LIU Shao-hong, QIN Zi-han, LOU Jin-fu. Experimental study of dynamic failure characteristics of coal-rock compound under one-dimensional static and dynamic loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(10): 2064-2075.
- [14] 闻磊, 李夕兵, 吴秋红, 等. 冻融循环作用下花岗岩斑岩动载强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1297-1306.
- WEN Lei, LI Xi-bing, WU Qiu-hong, et al. Dynamic strength of granite porphyry under freezing-thawing cycles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(7): 1297-1306.
- [15] 尹士兵. 考虑温度效应的岩石动力学行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- YIN Tu-bing. Study on dynamic behavior of rocks considering thermal effect[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [16] 杨福见, 胡大伟, 周辉, 等. 动载扰动后花岗岩物理力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1459-1467.
- YANG Fu-jian, HU Da-wei, ZHOU hui, et al. Study on physical and mechanical properties of granite after dynamic disturbance[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(6): 1459-1467.
- [17] 长江水利委员会长江科学院. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- Yangtze River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission. SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.
- [18] 黄理兴. 岩石动力学研究成就与趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2889-2900.
- HUANG Li-xing. Development and new achievements of rock dynamics in China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 2889-2900.
- [19] ULLEMEYER K, SIEGESMUND S, RASOLOFOSAON P N J, et al. Experimental and texture-derived P-wave anisotropy of principal rocks from the transalp traverse: an aid for the interpretation of seismic field data[J]. **Tectonophysics**, 2006, 414: 97-116.
- [20] 刘祖沅, 胡毓良, 陈颀. 单轴压缩下干燥和饱水岩石中超声 P 波的衰减[J]. 地球物理学报, 1984, 27(4): 349-359.
- LIU Zu-yuan, HU Yu-liang, CHEN Yong. Ultrasonic P-wave attenuation in dry and saturated rocks under uniaxial compression[J]. **Acta Geophysica Sinica**, 1984, 27(4): 349-359.
- [21] 郑贵平, 赵兴东, 刘建坡, 等. 岩石加载过程声波波速变化规律试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(8): 1197-1200.
- ZHENG Gui-ping, ZHAO Xing-dong, LIU Jian-po, et al. Experimental study on change in acoustic wave velocity when rock is loading[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2009, 30(8): 1197-1200.
- [22] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 单轴加载条件下花岗岩声发射及波传播特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1133-1144.
- ZHANG Guo-kai, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al.

- Experiment study on acoustic emission and wave propagation in granite under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(5): 1133-1144.
- [23] 胡明明, 周辉, 张勇慧, 等. 单轴加载过程中砂岩声学特性研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4468-4474.
HU Ming-ming, ZHOU Hui, ZHANG Yong-hui, et al. Analysis of acoustic property of sandstone under uniaxial loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(12): 4468-4474.
- [24] 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 花岗岩破裂过程中声波与声发射变化特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1915-1923.
LI Hao-ran, YANG Chun-he, LIU Yu-gang. Experimental research on ultrasonic velocity and acoustic emission properties of granite under failure process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(10): 1915-1923.
- [25] 赵明阶, 吴德伦. 单轴加载条件下岩石声学参数与应力的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 50-54.
ZHAO Ming-jie, WU De-lun. Ultrasonic velocity and attenuation of rock under uniaxial loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(1): 50-54.
- [26] 金解放, 李夕兵, 王观石, 等. 循环冲击载荷作用下砂岩破坏模式及其机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1453-1461.
JIN Jie-fang, LI Xi-bing, WANG Guan-shi, et al. Failure modes and mechanisms of sandstone under cyclic impact loadings[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2012, 43(4): 1453-1461.
- [27] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990: 152-166.
XIE He-ping. Rock concrete damage mechanics[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990: 152-166.
- [28] 李清, 张茜, 李晟源, 等. 爆炸应力波作用下分支裂纹动态力学特性试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3026-3032.
LI Qing, ZHANG Xi, LI Sheng-yuan, et al. Experimental study of dynamic fracture behaviors of branched cracks under blasting stress wave[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3026-3032.
- [29] 金解放, 李夕兵, 邱灿, 等. 岩石循环冲击损伤演化模型及静载荷对损伤累积的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1662-1671.
JIN Jie-fang, LI Xi-bing, QIU Can, et al. Evolution model for damage accumulation of rock under cyclic impact loadings and effect of static loads on damage evolution[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(8): 1662-1671.
- [30] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1771-1776.
SHAN Ren-liang, XUE You-song, ZHANG Qian. Time dependent damage model of rock under dynamic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1771-1776.
- [31] 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 Xi-bing, GONG Feng-qiang, 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.
- [32] LI X B, LOK T S, ZHAO J. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2005, 38(1): 21-39.
- [33] 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(1): 211-219.
- [34] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵, 等. 一维动静组合加载下砂岩动力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2076-2085.
GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, LIU Xi-ling, et al. Experimental study of dynamic characteristics of sandstone under one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2076-2085.
- [35] LEMATIRE J. How to use damage mechanics[J]. **Nuclear Engineering & Design**, 1984, 80(1): 233-245.
- [36] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30-34.
ZHANG Quan-sheng, YANG Geng-she, REN Jian-xi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 30-34.
- [37] 吴政, 张承娟. 单向荷载作用下岩石损伤模型及其力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 55-61.
WU Zheng, ZHANG Chen-juan. Investigation of rock damage model and its mechanical behaviour[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1996, 15(1): 55-61.