

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.038

引用格式:陈信作,蔡勇智,梁霁兴,等. 三维动静组合加载下混凝土动态力学特性及模拟研究[J]. 重庆大学学报, 2026,49(3): 107-122.



三维动静组合加载下混凝土动态力学特性及模拟研究

陈信作^{1a}, 蔡勇智^{1b}, 梁霁兴^{1b}, 刘磊^{1b,2}, 徐泽辉^{1a,2}

(1. 昆明理工大学 a. 公共安全与应急管理学院; b. 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南省中-德蓝色矿山与特殊地下空间开发利用重点实验室, 昆明 650093)

摘要:为研究三维动静组合加载下混凝土的动态力学特性,开展了轴压、围压和冲击载荷组合的分离式霍普金森压杆(SHPB)实验,并在LS-DYNA程序中引入应力初始化方法,利用“隐式静态分析”“显式动态分析”分步加载方式对动静组合加载实验进行了模拟,分析了不同静载组合对混凝土材料强度特性和破坏特征的影响。结果表明,相同冲击速度下,混凝土的动态强度与围压值呈正相关,围压对试件具有保护作用;轴压存在压密临界值,在临界值前后对混凝土材料分别表现出增强和劣化作用。模拟中引入应力初始化方法可以较好地实现动态分析前恒定预应力的加载,实验与模拟结果对比分析得出静载组合作为外部结构荷载改变试件内部应力分布是影响试件动态强度的主要因素。数值模拟可以较好地呈现混凝土在动静组合加载下冲击破坏过程,混凝土的破坏特征为压剪破坏。通过分析损伤变量时程曲线可较好地对混凝土的破坏程度进行预测。

关键词:动静组合加载;应力初始化;混凝土;数值模拟;损伤变量

中图分类号:TU354

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)03-107-16

Dynamic mechanical behavior and numerical simulation of concrete under three-dimensional coupled static-dynamic loading

CHEN Xinzuo^{1a}, CAI Yongzhi^{1b}, LIANG Jixing^{1b}, LIU lei^{1b,2}, XU Zehui^{1a,2}

(1a. Faculty of Public Security and Emergency Management; 1b. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China; 2. Yunnan Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space, Kunming 650093, P. R. China)

Abstract: To study the dynamic mechanical behavior of concrete under three-dimensional coupled static-dynamic loading, split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiments were carried out under combined axial compression, confining pressure, and impact loading. A stress initialization method was introduced into the LS-DYNA program, and a sequential analysis approach consisting of implicit static loading followed by explicit transient dynamic loading was used to simulate the coupled static-dynamic loading process. The influence of different static load combinations on the strength and failure characteristics of concrete was systematically analyzed. The results show

收稿日期:2025-03-16 网络出版日期:2025-11-12

基金项目:云南省“兴滇英才支持计划”(KKXX202521089);云南省重大科技专项(202202AG050014)。

Supported by Yunnan Province's "Xingdian Talent Support Program" (KKXX202521089), and Yunnan Province's Major Science and Technology Special Project (202202AG050014).

作者简介:陈信作(1996—),男,硕士.主要从事火灾安全研究,(E-mail)13350341263@163.com。

通信作者:刘磊,博士,教授,(E-mail)kgliulei@kust.edu.cn。

that, at the same impact velocity, the dynamic compressive strength of concrete increases with increasing confining pressure, which provides a protective effect on the specimen. A critical axial compression value is observed: below this threshold, axial compression enhances specimen strength, whereas beyond it, axial compression leads to strength deterioration. The introduction of the stress initialization method enables accurate realization of constant pre-stress conditions before dynamic analysis. Comparative analysis between experimental and numerical results shows that static loading provides limited compaction enhancement, while changes in static load combination significantly alter the internal stress distribution, which is the main factor affecting the dynamic strength of concrete. Numerical simulations effectively capture the failure process of concrete under three-dimensional coupled static-dynamic loading, revealing that the dominant failure mode is compressive-shear failure. Furthermore, the damage evolution of concrete can be reliably predicted by analyzing the time-history curves of damage variables in the numerical model.

Keywords: coupled static-dynamic loading; stress initialization; concrete; numerical simulation; damage variable

随着社会的发展,混凝土材料已广泛应用于隧道工程、地下能源储备工程、地铁工程、军事防御工程等特殊工程领域^[1-3]。从空间受力维度分析,特殊工程结构大都处于复杂应力状态,当建筑遭受地震、军事打击或恐怖袭击引起的振动、爆炸冲击荷载时,在惯性效应和应变率效应耦合作用下导致混凝土构件的动态损伤规律十分复杂。因此,从动静耦合荷载角度研究混凝土动力灾害的演化规律和过程对工程改善和后期修复有着重要的理论指导意义。

三维动静组合加载系统可对岩石、混凝土类脆性材料进行不同静载组合下的动态冲击实验^[4-6],可以较好地模拟处于复杂应力环境下的混凝土构件遭受爆炸、地震等动荷载扰动的工况。近年来,国内外学者对岩石、混凝土类材料在复杂应力状态下的动力学性能开展了大量研究,并取得了一些进展。以三维动静组合加载系统为例,该装置通过预先施加轴向静压和侧向围压荷载,然后进行冲击从而实现三维动静组合加载。宫凤强等^[7]开展了三维动静组合加载下砂岩力学特性试验研究,认为轴压比在一定范围内时砂岩的抗压强度会随着轴压的增大而逐步减小,随围压增加抗压强度有较大提高,组合加载下的破裂形式为压剪破坏。研究发现,轴压主要影响试件在动态冲击载荷作用前其内部结构的损伤程度,表现出抗压强度降低的特征,同时发现较小的轴压比对试样有压密作用从而提升动态抗压强度,轴压存在一个使试件发生损伤的临界值^[8-9]。围压的作用表现在可以改变试样的应力分布状态,增强了颗粒间的咬合力,在遭受冲击荷载时,约束了试件的径向破坏趋势,在一定程度上降低了试件的破坏程度,表现出抗压强度增大^[10]。其他研究大多从轴压、围压对试件应力分布及压密特征的影响角度出发,并结合抗压强度、应力应变曲线、弹性模量、能量特征及破坏模式对静载组合的影响规律进行分析^[11-12]。对于两种角度之间,何为主要因素、次要因素的研究尚不充分。考虑轴压、应变率因素的一维动静组合加载下的研究较多,考虑轴压、围压、应变率因素的三维动静组合加载下的研究较少;岩石类材料的研究较多,混凝土材料的研究较少,亟须对三维动静组合加载下混凝土力学性能开展实验研究。

随着 CAE (computer aided engineering) 技术的不断发展,许多学者利用数值模拟手段来研究混凝土的力学响应特征和破坏特征,并结合物理实验进行对比验证,得出的结果具有更高的可信度。左宇军等^[13]、袁伟等^[14]分别采用 RPA、LS-DYNA 软件对动载荷作用下围压对试样破坏的影响进行了数值研究。刘德克等^[15]利用 FLAC 软件对岩石在一维动静组合加载下的受力状态进行了模拟,直接将预应力和冲击荷载施加后进行显式计算往往会导致预应力施加不稳定,如不能准确地计算试件模型中的初始应力状态,势必会导致后期动力分析的误差^[16],需对动力数值模型进行应力初始化分析。杨家彩等^[17]对数值模拟中应力初始化的方法进行了总结,认为动态文件法获得的应力初始化结果与所选用的材料模型密切相关,且结果与最常用的隐式分析基本一致,计算时长相对较短。Rui 等^[18]、王晓雨等^[19]在 LS-DYNA 中采用动态文件法对初始应力进行计

算,并采用分步加载方式分别对三维应力状态下花岗岩、砂岩 SHPB 实验进行了模拟,认为初始应力对裂纹扩展具有一定抑制作用。

综上所述,目前关于混凝土材料在不同轴压和不同围压下受冲击荷载时的力学性能的研究较多,但考虑的静载组合(轴压、围压)范围较小,复杂应力状态下混凝土类材料的动态破坏特征的研究较少,对应的模拟中试件初始预应力的施加方式仍存在不足之处。为了更加接近实际工况,有必要结合物理实验和更有效的模拟手段对复杂应力状态下混凝土的动态力学性能和破坏特征进行研究。文中综合考虑轴压、围压之间的关系,利用三维动静组合加载系统对混凝土力学特性开展了实验研究,并在 LS-DYNA 中引入应力初始化的方法,实现了预应力和冲击荷载分步加载,并与一步加载下的模拟效果进行对比,在此基础上,对混凝土三维动静组合加载实验进行了模拟,通过实验与模拟相互验证,分析了不同静载组合参数对混凝土材料强度特性和破坏特征的影响。

1 实验概况

1.1 实验装置及试件制备

实验采用三维动静组合加载实验系统,如图 1 所示。设备的主体结构包括动力系统、入射杆、透射杆、吸能杆及数据采集系统。子弹和压杆由高强度钢制成,密度为 $7\ 850\ \text{kg/m}^3$,弹性模量为 $210\ \text{GPa}$,泊松比为 0.3 ,纵波波速为 $5\ 173\ \text{m/s}$ 。入射杆、透射杆长度均为 $2\ 000\ \text{mm}$,子弹长 $265\ \text{mm}$,撞击面直径 $15\ \text{mm}$,中部直径 $50\ \text{mm}$ 。该装置在常规单轴 SHPB 基础上进行了改进,设置了轴压加载系统和侧向围压加载系统,轴压加载系统通过给入射杆和透射杆施加压力,从而实现混凝土试件的轴压加载。

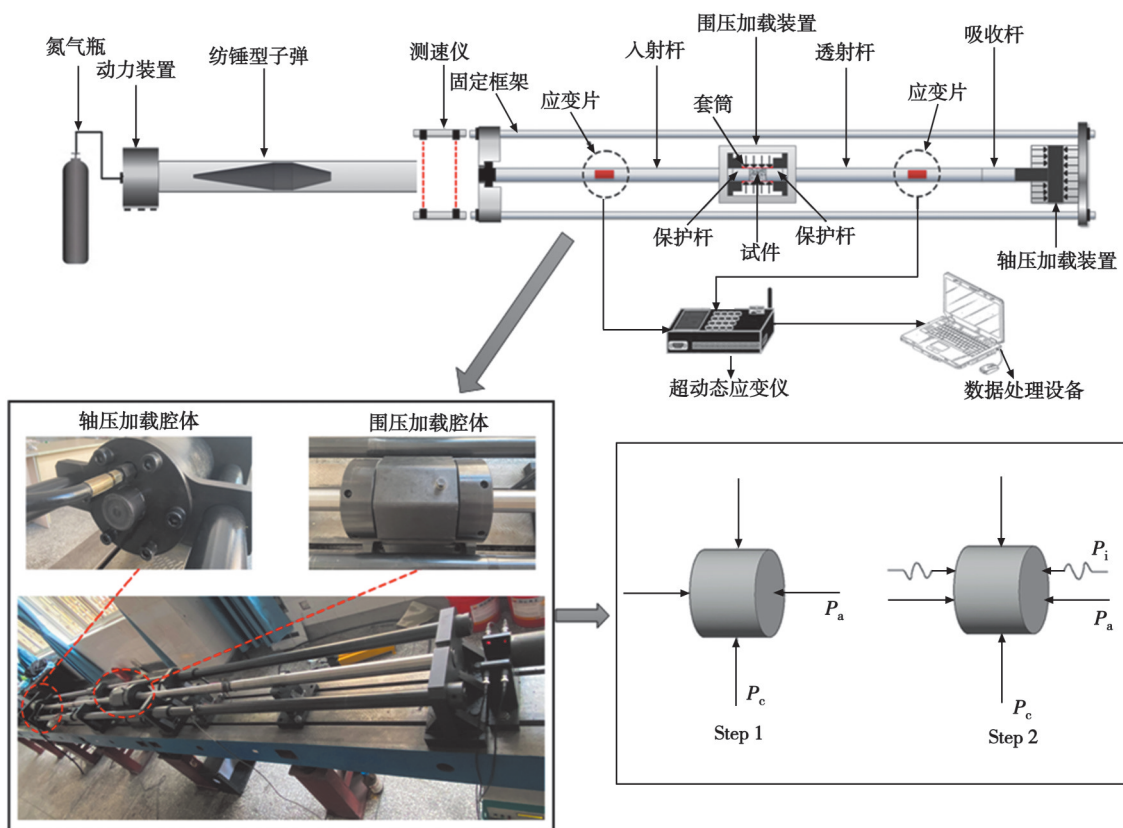


图 1 三维动静组合加载实验系统

Fig. 1 Experimental system of three-dimensional coupled static-dynamic loading

SHPB 实验的原理建立在 2 个基本假定基础上,即一维假定和应力均匀性假定,该假定在动静组合加载实验中同样适用^[20]。加载过程中,通过黏贴在入射杆与透射杆上的应变片实现波形信号的采集,再由数据处理系统进行数据计算。利用三波法对数据进行处理,得出混凝土试件平均应力(σ_s)、平均应变(ϵ_s)、平均应变

率($\dot{\varepsilon}_s$)如式(1)~(3)所示。

$$\sigma_s = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{A_0}{2A_s} E(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t), \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = \int_0^t \dot{\varepsilon}_s dt = \frac{C_0}{L_s} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt, \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{v_1 - v_2}{L_s} = \frac{C_0}{L_s} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t), \quad (3)$$

式中: ε_i 、 ε_r 、 ε_t 分别为入射应变、反射应变、透射应变; E 、 C_0 、 A_0 分别为压杆的弹性模量、波速、截面面积; A_s 、 L_s 分别为试件截面面积、长度; t 为脉冲信号在混凝土试件中传播的时间, s ; σ_1 、 σ_2 分别为试件入射和透射端应力; v_1 、 v_2 分别为试件入射和透射端质点速度。

按照规范制备强度等级为C40的混凝土基体,水灰比为0.4,砂率为0.3,具体配合比如表1所示。考虑到混凝土试件具有很强的尺寸效应,为尽量消除尺寸效应,保证实验结果的可靠性,在制备前需要严格控制粗骨料级配,粗骨料采用的是5~16 mm连续级配碎石,使用尺寸为2.36、4.75、9.5、14.0 mm的方孔筛对碎石进行筛分,碎石最大公称粒径为14 mm,并采用二级级配,5~10 mm:10~16 mm碎石按3:7比例掺配,保证粗骨料的良好级配。细骨料为天然河砂,含泥量按质量计为1.8%,细度模数为2.4。在标准养护室养护28 d后,经取芯、切割、打磨成尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的静力学试件和 $\Phi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的动力学试件。为避免试件端面不平行效应对冲击压缩实验结果造成影响,试件在打磨后两端面平整度需符合ISRM要求。根据相关规范,利用HUT-106A双空间电液伺服实验机对混凝土试件进行基本力学实验,物理参数和静力学参数如表2所示。

表1 混凝土试件的配合比

					kg/m ³	
水泥	水	细骨料	粗骨料	粉煤灰	减水剂	
463	185	541	1 261	93	2.25	

表2 C40混凝土试样物理参数和力学特性

密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/GPa	波速/(m·s ⁻¹)	抗拉强度/MPa	静态压缩强度/MPa
2310	0.28	34.6	3 972	3.99	41.5

考虑到长径比越小,应力波在试件中更容易达到应力平衡,但过小又会由于压杆和界面的横向运动不同产生摩擦从而破坏一维应力状态,当试件长径比 $L_s/\Phi \approx (0.4 \sim 1)$ 时实验结果可信^[21],结合以往经验,可在小尺寸SHPB装置中适当增加混凝土试件长径比,文中动力学试件长径比设置为0.8。同时注意到混凝土类脆性材料破坏应变很小,在用传统矩形波加载时,试样往往在达到应力平衡之前已经破坏,因此未达到应力平衡之前的测试数据不能用于结果计算,参考已有成果^[22],选用纺锤形子弹来产生半正弦加载波,在一定程度上可对试件的恒应变率变形进行改善,同时可减小波形弥散对实验结果的影响。通过“三波法”对测试结果进行应力均匀性检验,入射应变和反射应变叠加后得到的曲线代表混凝土与入射杆界面的应力历史,透射应变曲线代表混凝土与透射杆界面的应力历史,两者的离散程度可以反映试件在加载过程中的应

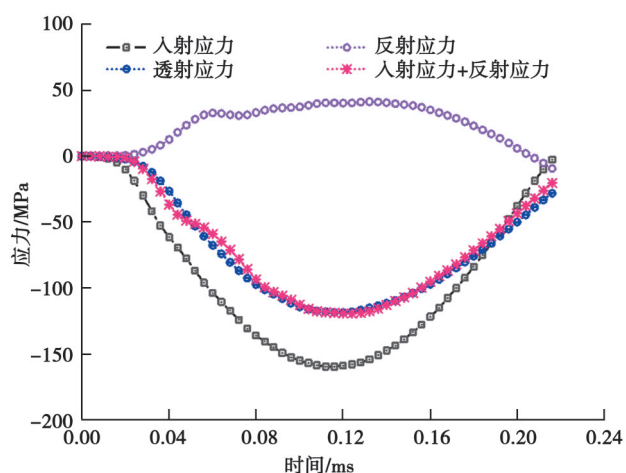


图2 应力均匀性验证

Fig. 2 Stress uniformity verification

力平衡状态,由图 2 可知,二者吻合度较好,满足应力均匀性条件。

1.2 实验方案

综合考虑实际工程构件所处应力状态及设备条件,实验分为常规单轴动态冲击实验和动静组合加载实验,静载组合中轴压值按照轴压比为 0、0.3、0.5、0.7 进行设置^[23](轴压比为轴压加载值与静态抗压强度之比),其值为 0、14.4、21.6、28.8 MPa,围压水平为 0、5、10、15 MPa。模拟爆炸引起的冲击荷载效果,选择 9.5 m/s 的冲击速度进行实验,对应试件的平均应变率在 125 s⁻¹ 附近,由于轴向力的施加将改变应变片的电阻,从而影响实验结果,为保障实验的有效性,在冲击前对应变片重新标定清零,保证轴压围压施加完成后对应变信号没有影响,再开展后续实验。每组工况进行多次实验,舍去离散性较大的数据,取有效实验的平均值作为最终结果。

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

不同静载组合参数下混凝土动态压缩实验结果如表 3 所示。

表 3 实验结果汇总
Table 3 Summary of experimental results

轴压/MPa	围压/MPa	应力/MPa	应变	轴压/MPa	围压/MPa	应力/MPa	应变
0	0	48.62 ₄ ±0.66	0.003 4	21.6	0	43.55 ₃ ±0.40	0.003 2
	5	51.77 ₃ ±0.45	0.003 8		5	52.67 ₃ ±0.69	0.003 6
	10	60.72 ₃ ±0.57	0.004 5		10	58.03 ₃ ±0.85	0.004 1
	15	66.37 ₃ ±0.78	0.005 6		15	62.64 ₃ ±0.87	0.005 2
14.4	0	53.29 ₄ ±0.73	0.003 8	28.8	0	37.86 ₃ ±0.58	0.002 5
	5	55.88 ₃ ±0.59	0.004 2		5	39.58 ₃ ±0.69	0.003 0
	10	64.36 ₃ ±1.21	0.004 7		10	45.86 ₃ ±0.74	0.003 4
	15	73.93 ₃ ±0.98	0.005 8		15	48.12 ₃ ±0.36	0.003 7

注:峰值应力表示形式为“平均值±标准差”,平均值后面的下标为试件个数。

2.2 动态抗压强度的变化规律

为更直观地分析不同静载组合对试件抗压强度的影响,绘制了动态抗压强度与轴压 σ_A 、围压 σ_C 的关系图,如图 3 所示。由图可知,轴压为 14.4 MPa、围压为 15 MPa 时,混凝土抗压强度达到最高为 73.93 MPa,比同等条件下单轴动态抗压强度提高了 52.1%;轴压 28.8 MPa、围压 0 MPa 时,混凝土的抗压强度最低为 37.8 MPa,比同等条件下的单轴动态抗压强度降低了 22.2%。在实验研究的范围内,试件的抗压强度与围压值呈正相关,这是因为围压能够改变试件内部应力分布方向,延后各变形破坏阶段,对混凝土起保护作用。随着轴压的增大,抗压强度先增大后减小,即轴压在 0~14.4 MPa,试件的抗压强度得到了提高,当轴压增大到 21.6 MPa 后,试件的抗压强度开始大幅降低。可以看出,轴压对试件不只是劣化作用,在一定加载范围内能够通过密实原始裂隙从而增强试件的抗压缩性能,当

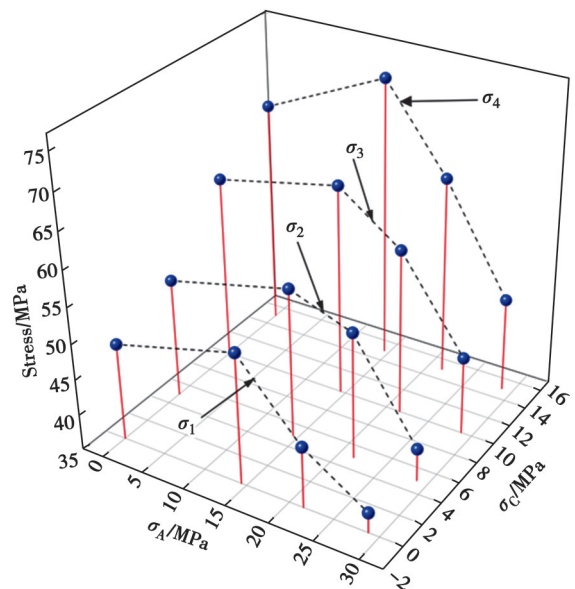


图 3 静载组合参数与动态抗压强度的关系
Fig. 3 Relationship between static load combination parameters and dynamic compressive strength

轴压达到一定数值后,会打破试件内部形成的应力结构,降低了试件抵抗损伤的能力,提前了变形破坏过程,试件的破坏结果也更为严重。由图中抗压强度的变化趋势可以看出,轴压存在1个使混凝土开始发生损伤的压密临界值($\sigma_{1,4}$),其值在14.4~21.6 MPa之间,超过该值后轴压对混凝土的抗压缩性能有劣化作用,导致试件后续的抗冲击能力减弱,该值的大小与围压的大小相关,对于不同材料和处在不同外部环境时其值也会受影响。

2.3 应力-应变曲线特征

为分析静载组合参数对混凝土变形特性的影响,建立了不同静载组合参数下试件的动态应力-应变曲线如图4和图5所示。可以看出,随着围压的增大,试件的抗压强度显著增加,破坏应变有缓慢右移的特征。应力-应变曲线弹性变形阶段和塑性变形阶段延长,但各围压下曲线整体的变化趋势基本一致。分析可知,围压使混凝土试件在径向发生微变形,混凝土内部结构得到夯实,波阻抗略微增大,透射能力增强。同时,围压作为外部结构荷载,对试件的径向破坏过程起约束作用,同一冲击荷载作用下,围压越大约束作用越强,试件的破坏程度越低,表现出透射应力增大,进而混凝土试件的抗压强度得到提高。随着围压增大,试件破坏的起始时间后移,表现出延性破坏的特性,破坏应变增加。即围压作用下,混凝土材料的力学承载能力有所提升,同时还具有明显的脆性-延性转化趋势。如图5所示,随着轴压的增大,试件的抗压强度先缓慢升高后显著降低,应力-应变曲线的弹性变形阶段和塑性变形阶段缩短,破坏应变有左移的规律特征。这是因为较小的轴压对试件初始裂隙有密实作用,表现出抗压强度升高;轴压继续增大,混凝土轴向承载能力不足以抵御荷载作用而发生损伤,试件被预先破坏后力学性能下降,裂隙的孕育能力增强,在遭受冲击后,试件内部裂隙迅速发展形成明显裂纹,整体结构塑性变形较为明显,混凝土试件的抗压强度降低。轴压作为外部结构荷

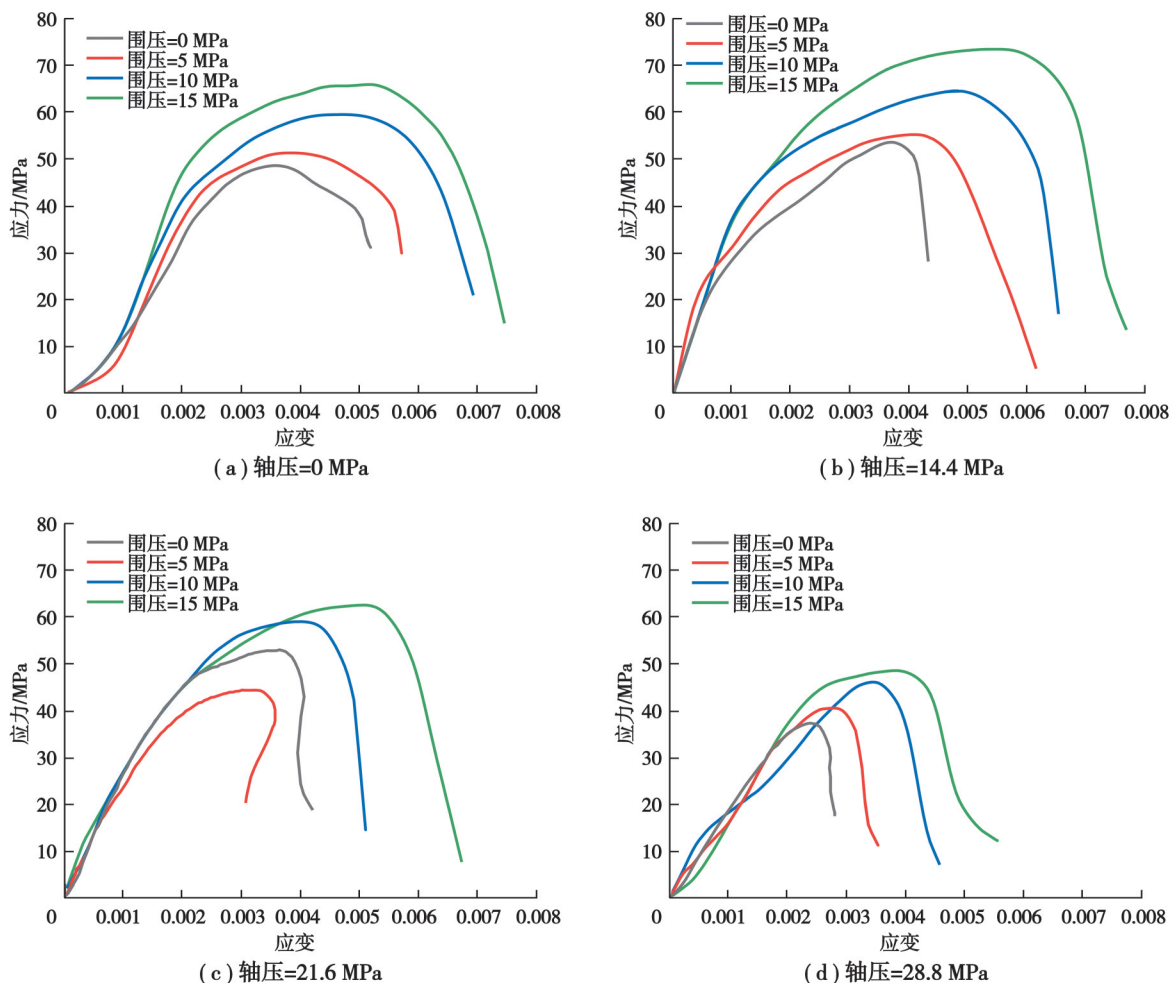


图4 不同轴压下 SHPB 压缩实验结果

Fig. 4 Experimental results of SHPB compression under different axial pressures

载,其加载方向与冲击方向一致,在一定程度上增强了冲击效果,试件遭受冲击荷载和轴向荷载耦合作用后容易丧失承载能力,承载能力一旦丧失,其在拉伸破坏之前能承受的最大应力降低,对塑性的极限抗力下降,混凝土内部裂纹的发展速度会比不施加轴压时更快。

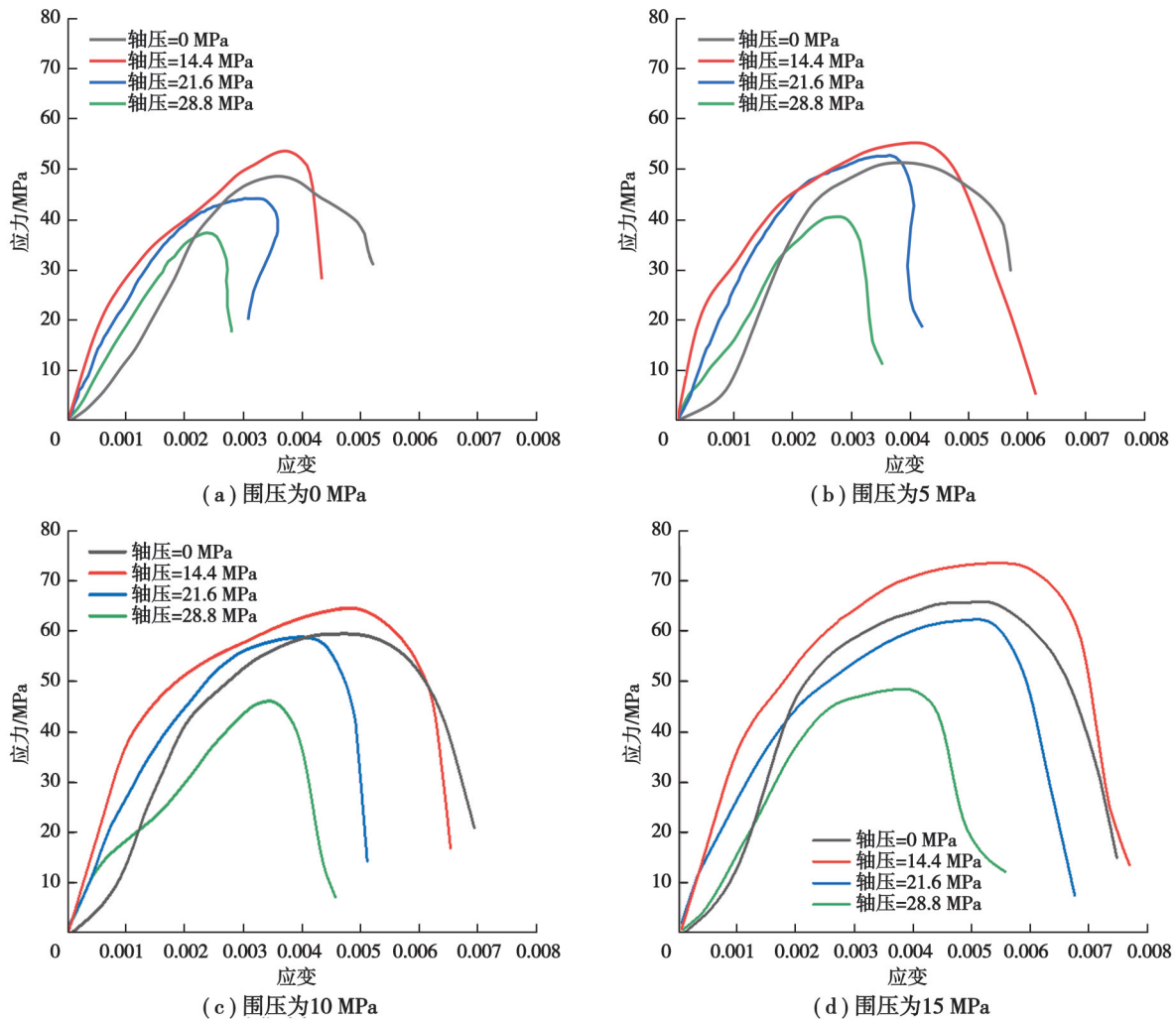


图5 不同围压下 SHPB 压缩实验结果

Fig. 5 Experimental results of SHPB compression under different confining pressures

3 数值模拟

3.1 数值模型的建立

考虑到实验装置静预应力加载步骤的繁琐性及加载范围的局限性,且只能通过应变信号得到应力-应变曲线来分析试件的动态力学特性,不能够观察试件在复杂应力环境下遭受冲击后的整个动态破坏过程,即通过 LS-DYNA 有限元软件对三维动静组合加载实验进行模拟分析。采用简化模型,包括子弹、入射杆、透射杆、试件,均采用 SOLID164 单元进行建模。子弹、入射杆、透射杆采用线弹性材料;试件采用 LS-DYNA 材料库中 111**MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE* 模型,基本力学参数由静力学实验试验获得,如表 2 所示,其他参数通过文献[24-25]中的公式和拟合方法获得,具体参数如表 4 所示。通过多次网格无关性模拟,得到有限元分析结果,不受更改网格大小影响的网格划分为:子弹轴向划分 265 份,径向划分 8 份,单元总数 46 710;入射杆、透射杆轴向划分 200 份,径向划分 8 份,单元总数 76 800;试块均分为 30 等份,单元总数 81 000,有限元模型如图 6 所示。根据实验情况定义接触算法,子弹和入射杆之间采用自动面面接触,杆件和试件之间采用面面侵蚀接触。接触处理算法选择罚函数法,采用文献[26]中方法,模拟出当罚函数因子

$K=0.5$ 时,模型基本满足一维假定。通过关键字*`MAT_ADD_EROSION`中最大主应变失效准则来控制试件破坏。按照实验情况对杆件的位移和转动进行约束,并在透射杆末端定义无反射边界,防止非物理波反射影响计算结果。

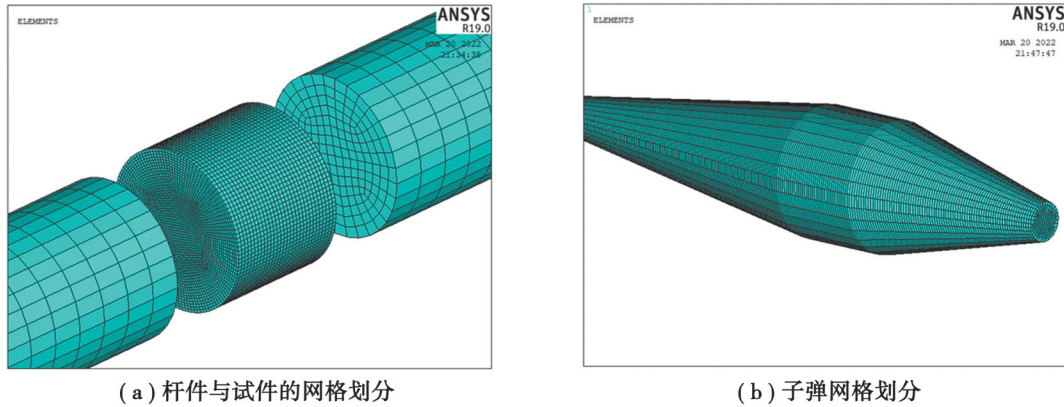


图6 有限元模型网格划分

Fig. 6 Finite element model meshing

表4 C40混凝土HJC模型参数

Table 4 C40 concrete HJC model parameters

基本参数	值	屈服面参数	值	损伤参数	值	状态方程参数	值
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 310	黏结强度指数 A	0.41	损伤常数 D_1	0.04	压碎压力 p_c/MPa	13.89
剪切模量 G/GPa	13.5	压力硬化值 B	1.2	损伤常数 D_2	1	压碎应变 μ_c	0.000 76
抗压强度 f_c/MPa	41.5	压力硬化指数 N	0.67	最小塑性应变 $E_{f,\text{min}}$	0.01	锁定压力 p_l/GPa	0.81
抗拉强度 T/MPa	3.99	应变率系数 C	0.006			锁定应变 μ_l	0.1
		参考应变率 $\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$	0.001			压力常数 K_1/GPa	85
		最大标准化应力 S_{max}	7			压力常数 K_2/GPa	-171
						压力常数 K_3/GPa	208

完成常规设置后,对试件实体单元进行轴压、围压加载。采用梯形线性加载方式定义轴压、围压的加载曲线(Lcid1、Lcid2),定义轴压、围压加载面(Seg1、Seg2),通过*`LOAD`关键字将加载曲线赋值到加载面如图7所示。将轴压、围压加载后直接进行动态冲击模拟,通过LS-PrePost后处理软件观察试件在轴压14.4 MPa,围压5 MPa条件下单元应力时程曲线如图8所示,可以看出冲击应力波在400 μs 时刚好传播到试件表面,同时观察到在400 μs 前试件的初始预应力加载值呈现出不平稳状态,且对400 μs 后的压力曲线产生较大波动。

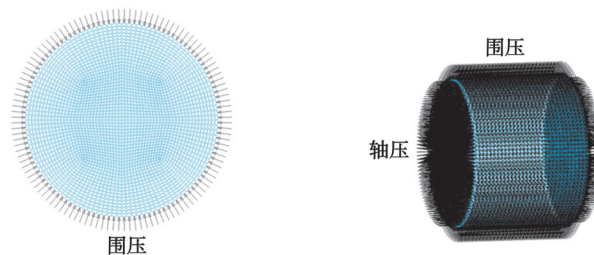


图7 加载示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the loading setup

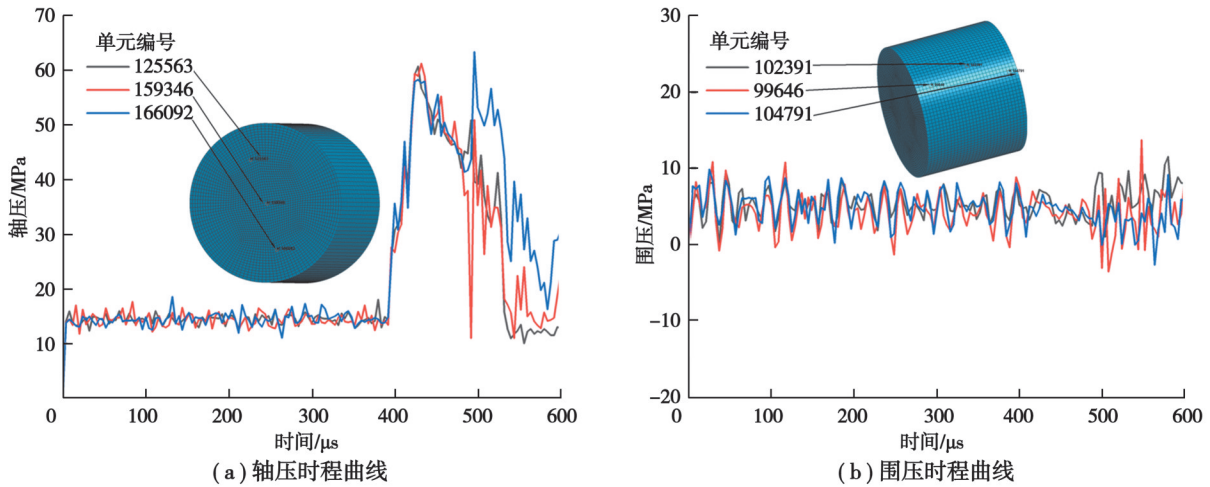


图 8 未经过初始化应力处理时压力时程曲线

Fig. 8 Pressure time history curves without initial stress treatment

3.2 应力初始化方法

LS-DYNA 是世界上著名的通用多物理场动力学分析程序,其应力初始化程序配合着 ANSYS 的隐式求解功能,开发了自带的隐式求解器,可实现隐式显式的混合计算方法。文中采用隐式应力初始化方法中的动态文件法对预应力进行分析,该方法通过调用 *INTERFACE_SPRINGBACK_LSDYNA 关键字来生成包含试件变形状态、预应力和应变数据的初始动态文件,通过该文件可以在显式计算前更新隐式分析后杆件和试件的几何变形及应力应变历史,在后续显式瞬态加载分析中,需先删除所有单元和节点组件,定义动荷载关键字和修改原位应力参数值,最后通过 *INCLUDE 命令使程序在计算中自动导入初始动态文件,作为显式动态分析的基础。值得一提的是,实验过程中霍普金森压杆也存在应力,但应变信号是通过应变片记录,应变数据不受杆中应力影响,数值模拟中由于没有对应变片进行建模,直接提取杆件上的应变信号,为避免其他初始力学量对模拟结果造成影响,对不同预应力施加方式的模拟结果进行对比分析,得出在试件周围施加预应力后采用应力初始化方法可以较好地还原三维动静组合加载的实验过程。

图 9 为轴压 14.4 MPa,围压 5 MPa 条件下混凝土轴向、径向的压力时程曲线。可以看出,在 400 μs 前,即冲击应力波达到试件表面前预应力加载值呈现出平稳状态,后续压力曲线波动较小对计算结果没有影响,说明引入应力初始化方法可实现试件预应力平稳加载,加载值与模拟定义值基本一致。

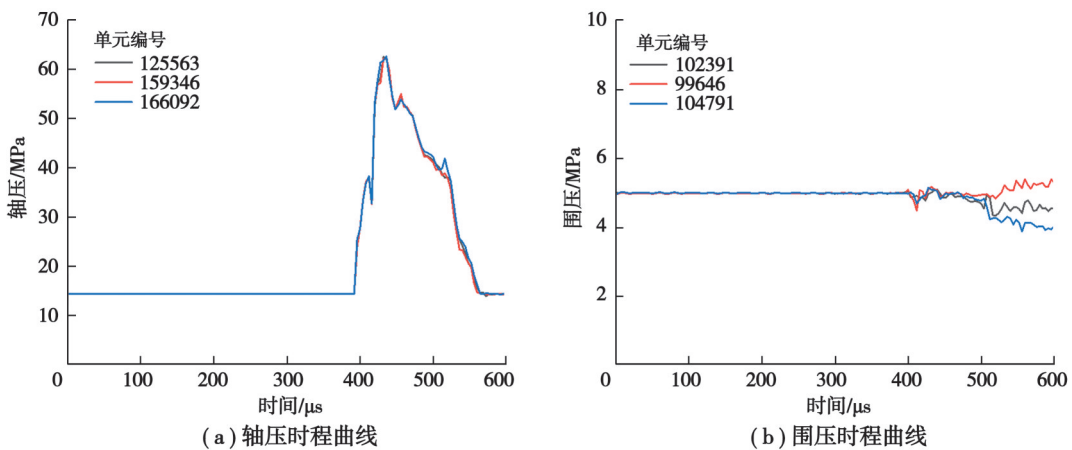


图 9 经过初始化应力处理时压力时程曲线

Fig. 9 Pressure time history curves with initial stress treatment

3.3 数值模型验证

图 10 为实验与模拟的应力时程曲线对比图,可以看出 2 种实验方法得到的应力时程曲线吻合度较好。通过高速摄影机记录了混凝土试件在单轴冲击压缩下的破坏过程,由图 11 可知,试件表现出径向拉伸破坏特征的宏观破坏过程,根据其破坏特征来对试件数值模型定义合适的失效准则。为更好地得出实验结果与数值模拟效果的吻合度,模拟和高速摄影仪中均选取应力波刚传播至试件时刻为时间零点,图 12 为应力传播典型时刻图。由图可知,数值模拟与实验的破坏形式具有一致性,即采用最大主应变失效准则来控制试件破坏的效果良好。

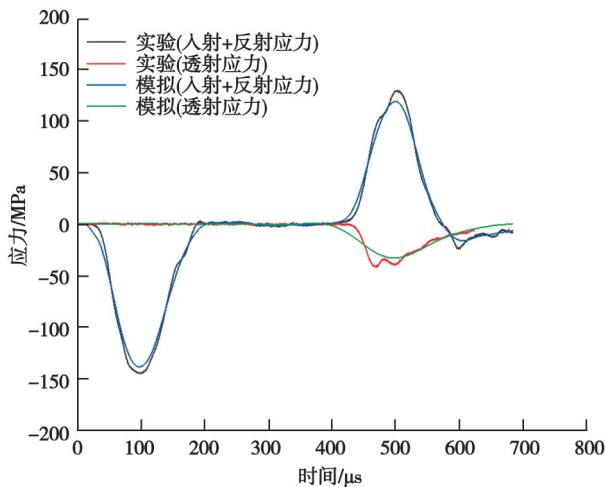


图 10 实验与模拟应力时程曲线对比

Fig. 10 Comparison of stress-time history curves between experimental and numerical results

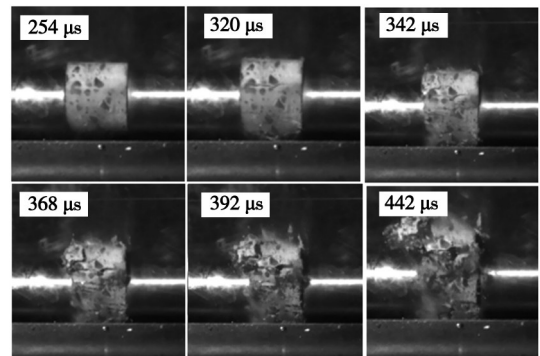


图 11 高速摄影下试件破坏过程

Fig. 11 Failure process of specimen under high-speed camera

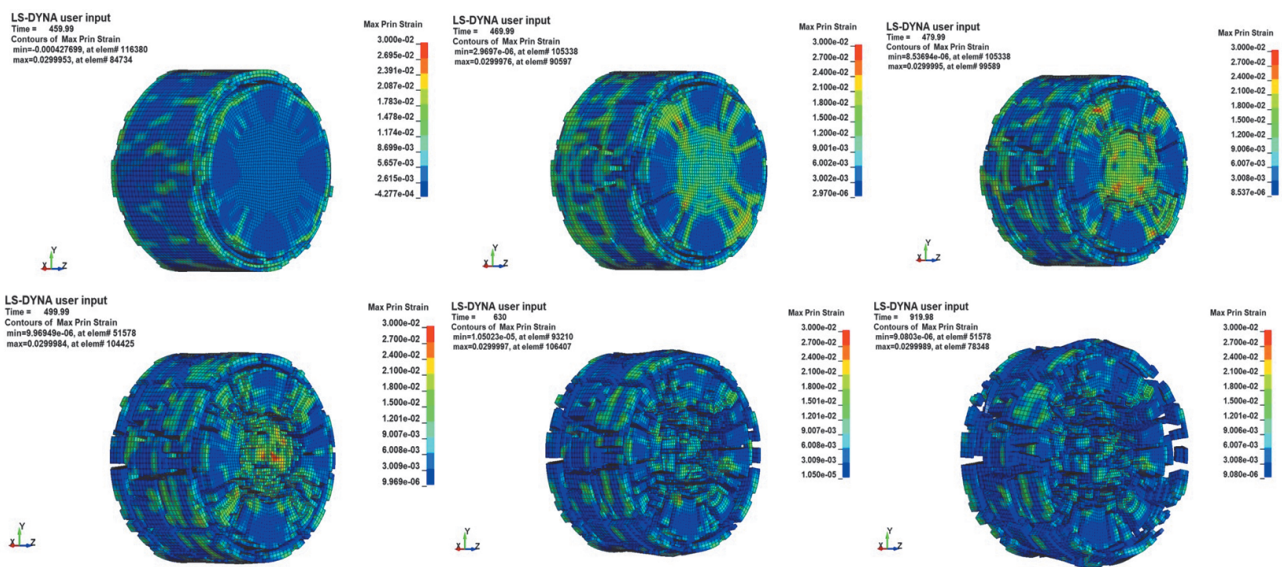


图 12 数值模拟下试件破坏过程

Fig. 12 Failure process of specimen under numerical simulation

通过模拟方法获得试件在动静组合加载下典型的裂纹和破坏特征,可知与实验结果吻合度较好,如图 13 所示。在单轴冲击下,如图 13(a)(b)所示,试件裂纹径向扩展以向外拉伸破坏产生竖向裂纹为主,在此基础上沿着骨料砂浆之间的界面进行破坏。在动静组合加载下,如图 13(c)(d)所示,试件裂纹径向以剪切裂纹为主,在剪切方向上沿着骨料、砂浆之间的界面进行破坏,表明所建立的有限元模型能够很好地预测动静组合加载下混凝土的动态压缩特性。

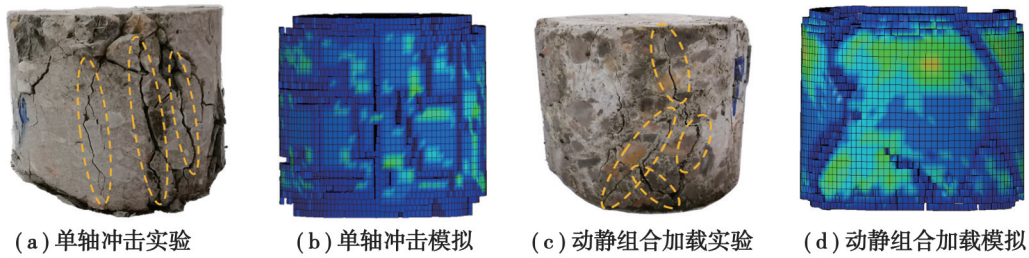


图 13 试件的破坏形态

Fig.13 Failure mode of the specimen

3.4 模拟曲线分析

对不同静载组合参数下混凝土 SHPB 实验进行数值模拟,计算完成后通过 LS-PrePost 后处理软件采集入射杆和透射杆上的应变时程曲线,按照三波法对数据进行处理,得到试件的应力-应变曲线。仅选取的工况水平为轴压 0、21.6 MPa,围压 0、10 MPa 的数据进行整理,并对数值模拟与实验得出的应力-应变曲线进行对比分析,如图 14 所示。

从图 14(a)(b)可知,轴压为 0 MPa 和 21.6 MPa 时,随着围压的增加,实验和模拟结果吻合度较好,抗压强度均呈上升趋势。结合现有的研究结论和数值模拟的“特殊性”进行分析,在不考虑初始裂隙的情况下,模拟和实验结果仍具有相同的变化趋势,说明围压的增强作用部分来源于对试件初始裂隙的挤压、密实,主要原

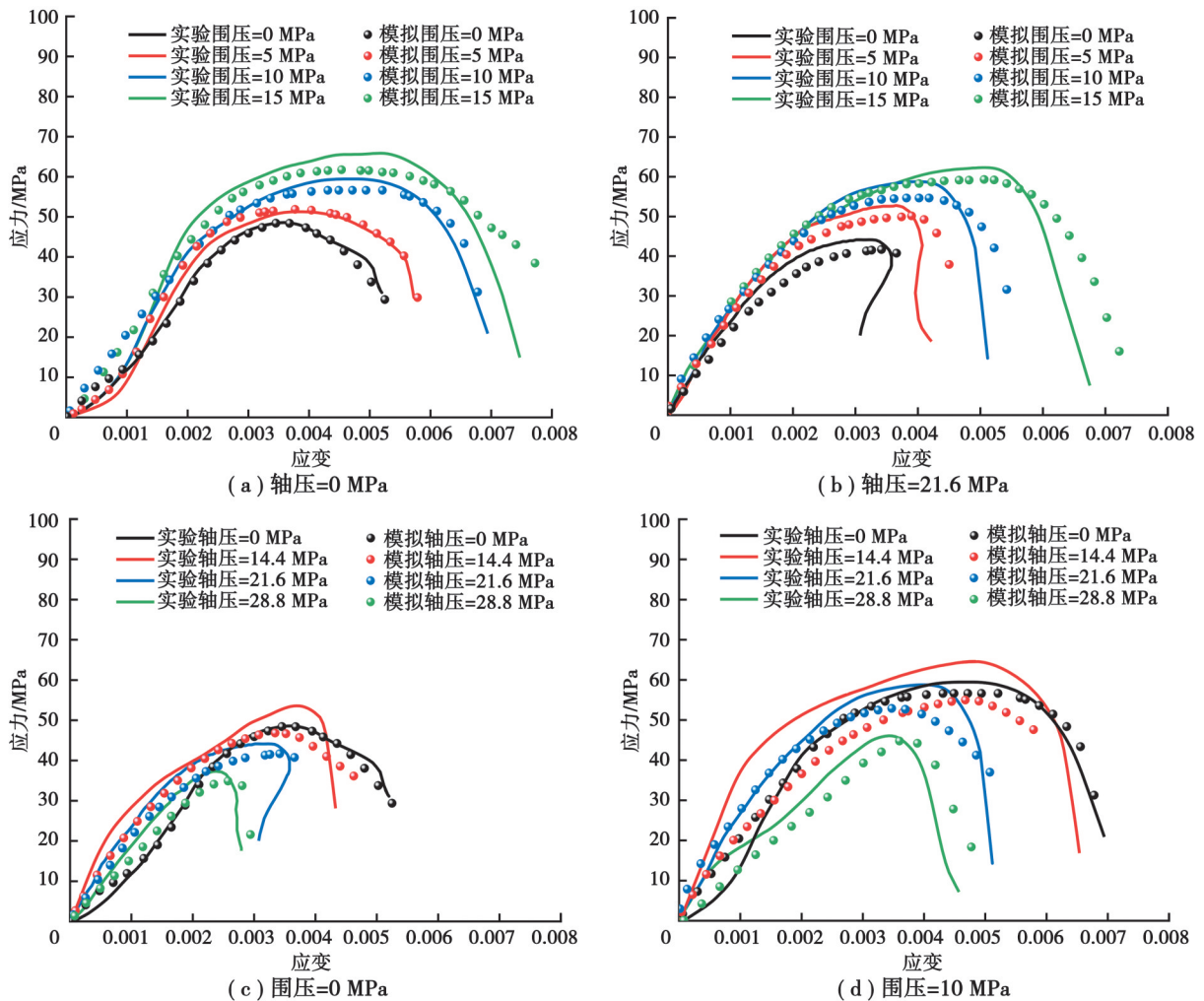


图 14 实验与模拟曲线对比

Fig. 14 Comparison of experimental and numerical curves

因是围压作为外部结构荷载,对试件的破坏具有约束作用,改变了冲击应力的分布方向,从而降低破坏效果。同时发现轴压为 0 MPa 时,实验曲线的弹性阶段差异性较大;而轴压为 21.6 MPa 时,曲线的弹性阶段比轴压为 0 MPa 时要更加稳定,这是因为轴压为 0 MPa 时,试件内部初始微裂隙尚未得到密实,冲击荷载会先对初始裂隙进行压密,再进入弹性阶段和塑性阶段,不同工况下压密效果具有一定的差异性,当轴压为 21.6 MPa 时,轴向荷载已超过试件压密临界值,试件内部微裂隙已得到充分密实,进行冲击后,表现出的弹性阶段较为稳定,对于模拟曲线来说,由于试件采用的 HJC 本构模型,其优势在于考虑了应变率因子,并自带损伤方程,可以较好地反映混凝土试件的应力-应变关系,但对于混凝土内部初始裂隙考虑不充分,内部结构较为理想化,因此不同轴压下模拟曲线的弹性阶段均相对稳定。

从图 14(c)(d)可知,模拟曲线中,随着轴压的增加,试件的抗压强度呈下降趋势,实验曲线随着轴压的增加,试件的抗压强度先增加后降低。当轴压值大于压密临界值后,模拟和实验曲线的变化趋势基本一致。这是因为在实验中,混凝土试件存在初始裂隙,较小的轴压对冲击前的试件具有压密增强作用,表现为动态抗压强度增加,而较大的轴压会对冲击前的试件造成损伤,表现为动态抗压强度降低。对于模拟而言,当轴压定义值小于实验压密临界值时,轴压对试件 HJC 本构模型并没有表现出对初始裂隙压密从而提升试件性能的作用,轴压仅作为外部结构荷载对试件模型具有挤压、约束作用,改变了试件模型内部的应力分布方向,由于轴压加载方向与冲击方向在同一水平,轴压在一定程度上增强了破坏效果,表现出动态抗压强度降低。当轴压较大时,模拟和实验曲线的变化趋势基本一致,结合现有的研究结论和数值模拟的“特殊性”进行分析,说明当轴压小于压密临界值,轴压对试件初始裂隙的压密增强作用大于轴压作为外部结构荷载对试件的劣化作用,表现出动态抗压强度增加,当轴压大于压密临界值,不存在初始裂隙的压密作用,轴压对试件的劣化作用主要来源于轴向外部荷载对试件轴向破坏应力的提升,表现出动态抗压强度降低。

3.5 破坏的过程及形态分析

图 15 给出冲击速度为 9.5 m/s,轴压 28.8 MPa,围压 5 MPa 条件下混凝土的破坏情况。通过 LS-PrePost 后处理软件可以清楚地观察子弹冲击后产生的应力波的传播过程及试件的动态破坏过程。在 464 μ s 时,应力波抵达试件位置,受边界效应的影响试样端面边缘处的有效应力最大,首先在试件端面边缘处发生剥落破坏;471 μ s 时,随着应力波在试样中继续传递,入射波应力在试件表面形成拉伸波,并逐渐向中间扩展;487 μ s 时,拉伸波在中部聚集,形成预破裂面;492 μ s 时,扩展路径上的单元应力达到试件的极限抗拉强度开始失效;519 μ s 时,由于轴向和径向预应力耦合会使试件内部产生剪应力,此时试件容易形成潜在剪切破坏面,在此基础上对试件进行冲击,试件侧面产生斜切裂纹,同时拉伸波在试件内部继续传递,中部开始破坏失效产生裂纹;567 μ s 时,裂纹继续向中间扩展,试件表面呈现出“*”形裂纹,表现为拉伸破坏特征的初始特征,但由于侧向围压的限制作用,试件整体没有径向分离的趋势,试件侧面裂纹继续衍生直至贯通整个试件,形成宏观破裂面。

从图 16 可以看出,三维动静组合加载条件下混凝土的破坏形态和单轴冲击加载时的破坏形态有明显差异。试件在无预应力约束条件下,其破坏特征主要为径向拉伸破坏,侧面裂纹沿着平行试块轴向方向进行发

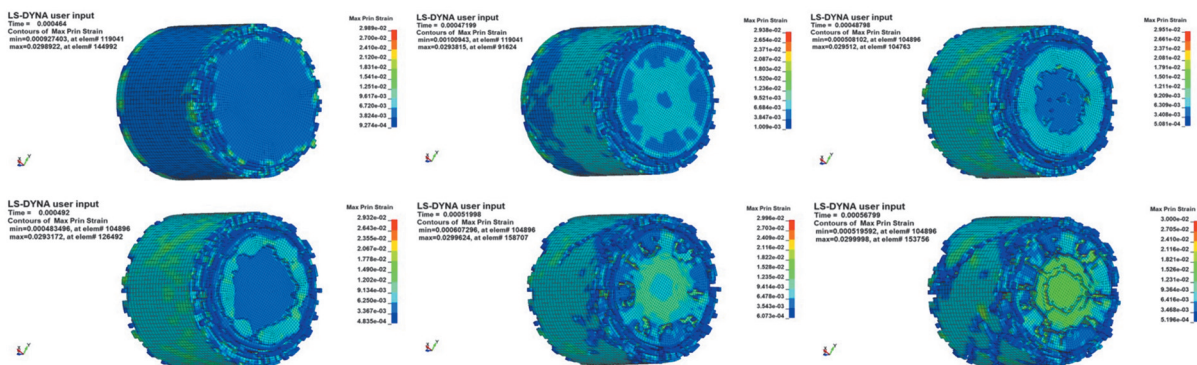


图 15 三维应力状态下试件破坏过程

Fig. 15 Failure process of specimen under three-dimensional stress state

展,如图16(a)所示。固定围压为5 MPa,观察试件在轴压为14.4 MPa时的破坏形态,可以看出围压荷载的存在改变了轴压荷载的分布方向,一定程度上降低了轴向冲击的破坏效果,仅在试件的接触端边缘产生了局部的裂隙,裂隙并不贯通试件上下平面,混凝土试件的完整程度较高,如图16(b)所示。当轴压继续增大到28.8 MPa时,虽有围压的保护作用,但试件承载能力不足以抵抗轴向主应力,从而衍生裂隙,受静载组合挤压影响,破坏不再是沿着平行试块轴向方向进行,而是沿一定的倾斜角度进行破坏,如图16(c)所示。综上所述可知,当存在一定的围压时,混凝土在动态冲击下很难发生完全破碎,通过控制轴向初始静荷载,增大冲击方向上的初始静荷载,可以增加试样的剪应力,然后在最大静荷载方向进行动态冲击加载,最终实现混凝土在动态冲击下产生明显破坏,动静组合加载下混凝土的破坏特征从径向拉伸破坏转变为压剪破坏^[27]。

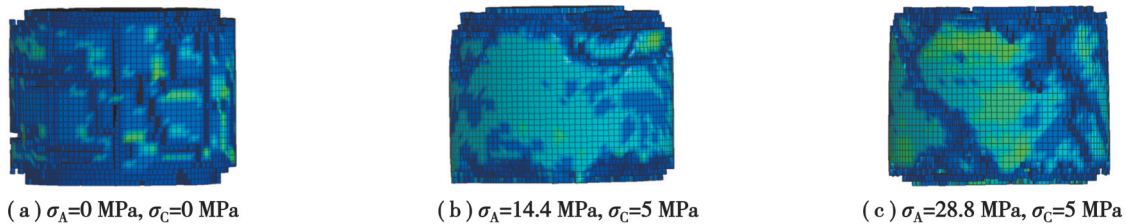


图16 不同动静组合下的破坏形态

Fig. 16 Failure modes under different static-dynamic load combinations

3.6 动载损伤过程分析

混凝土材料在冲击实验过程中发生破坏的本质为内部裂缝在动荷作用下不断萌发、扩展、聚集,最终引发宏观破碎过程,其破坏模式、碎块尺寸形态可直接反映试件受力状态及破损程度,研究材料的破坏规律可对工程结构的损伤修复评估及防护工程的防御检验提供一定的理论依据^[28-29]。物理实验中,可通过计算碎块分形维数值来衡量试件的损伤程度,该方法具有一定的有效性,但存在筛分步骤繁琐、测量误差大等缺点,而在数值模拟中,定义好材料的本构参数和失效准则后可直接通过关键字*DATABASE_EXTENT_BINARY来输出材料的损伤历史变量,通过最终损伤值可以衡量试件的损伤程度。文中混凝土试件采用的是HJC本构模型,其损伤变量为1号历史变量,在LS-PrePost中通过选项卡“history var#1”得到轴压28.8 MPa、围压5 MPa工况下试件的损伤变量时程曲线如图17所示。

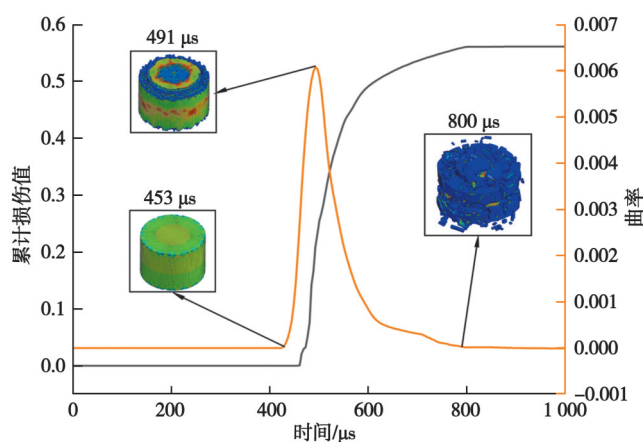


图17 损伤变量时程曲线

Fig. 17 Time-history curves of damage variables

可以看出,试件在453 μs时,开始发生损伤,单元开始失效被删除;在453~491 μs,损伤变量时程曲线的斜率大幅上升,累计损伤值迅速增长,试件内部裂纹在该阶段得到充分发展;491 μs时,损伤变量的增长速度达到最大值,从图中可看出,此时试件中部已形成破裂面;491~800 μs,试件损伤变量的增长速度大幅降低,

此阶段剩余冲击能量逐渐散去,当冲击能量不足以继续发展裂隙后,试件的损伤变量在残余强度的承载下保持不变;800 μs 后,累计损伤值趋于平稳,试件单元不再发生破坏失效。

为研究不同静载组合和冲击荷载耦合对损伤发展的影响规律,绘制了不同工况下试件的损伤变量时程曲线图,如图18所示。由图18(a)可知,轴压值保持不变的情况下,试件的最终损伤值随着围压的增大呈下降趋势,相同时间下损伤曲线上升阶段的斜率随围压的增大而减小,同时发现增加围压会延后试件开始发生损伤的时间,损伤变量上升阶段的持续时间也会缩短,该现象可较好地解释物理实验中试件随围压的增大表现出延性破坏特征的原因。由18(b)可知,围压保持不变的情况下,试件的最终损伤值与轴压值呈正相关趋势,相同时间下损伤曲线上升阶段的斜率随轴压的增大而增大,损伤变量上升阶段的持续时间随轴压增大逐渐延长,同时发现不同轴压下损伤变量时程曲线的初始阶段重合性较好。说明轴压作为外部结构荷载,在一定程度上提升了冲击效果,导致试件很容易发生破坏,轴压越大,试件裂纹的扩展速度越快,破坏损伤越严重,该结论与现阶段实验研究结论一致。即在数值模拟中通过分析损伤变量时程曲线可较好地对混凝土的破坏程度进行预测。

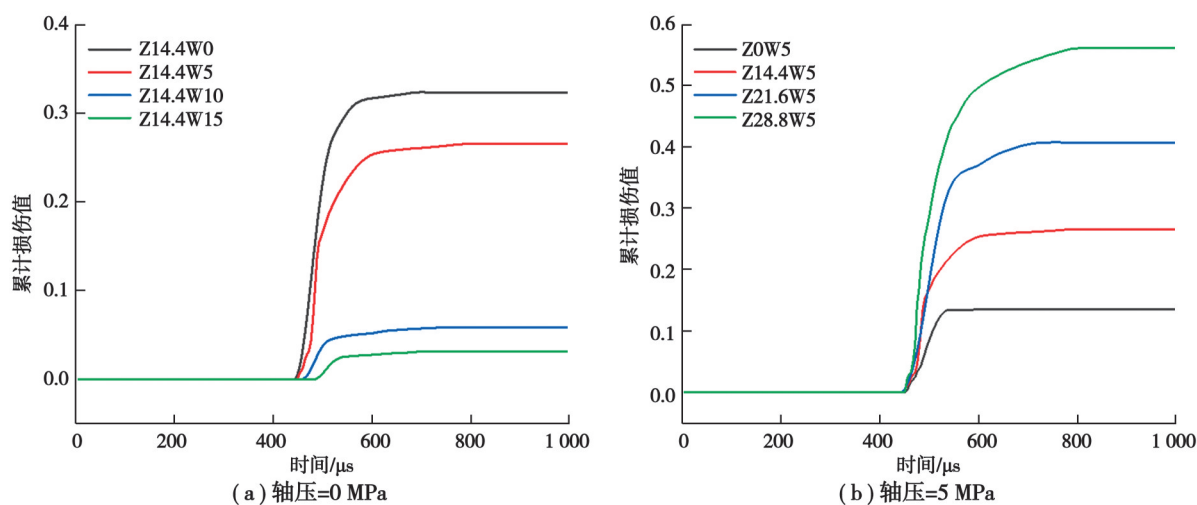


图18 不同静载组合下试件损伤变量时程曲线

Fig. 18 Time-history curves of damage variables under different static load combinations

4 结 论

文中对不同静载组合下混凝土动态力学性能进行了实验研究,并在LS-DYNA有限元程序中引入了应力初始化的方法对混凝土三维动静组合加载实验进行了模拟,通过实验与模拟相互验证,得到以下主要结论:

1)混凝土的抗压强度与围压值呈正相关,围压增强了混凝土内部的应力结构,对试件具有保护作用;轴压存在1个压密临界值。临界值前,轴压对试件具有增强作用;临界值后,轴压对试件有劣化作用,压密临界值受外部环境和材料性质影响。

2)通过应力初始化方法可以较好地实现动态分析前的预应力加载,解决了直接冲击模拟过程中应力状态无法保持恒定的问题,并结合“显式动态分析”实现了三维动静组合加载实验模拟,由实验和模拟结果对比分析得出静荷载对试件的压密增强作用有限,静载组合作为外部结构荷载改变试件内部应力分布是影响试件动态强度的主要因素。

3)三维动静组合加载条件下混凝土的破坏形态和单轴冲击条件下的破坏形态有明显差异。试件在无预应力约束条件下,侧面裂纹沿着平行试块轴向方向进行发展,破坏特征为径向拉伸破坏;试件在初始静荷载的作用下内部剪应力增强,进行动态冲击加载后沿一定的倾斜角度进行破坏,破坏特征为压剪破坏。

4)围压可减小试件的最终损伤值,同时延缓试件发生损伤的时间,而轴压会加快试件裂纹的扩展速度,增大试件的最终损伤值。在数值模拟中通过分析损伤变量时程曲线可较好地对混凝土的破坏程度进行预测。

参考文献

- [1] Abrishambaf A, Pimentel M, Nunes S. Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 97: 28-40.
- [2] 崔光耀,王道远,倪高陟,等. 软弱围岩隧道钢纤维混凝土衬砌承载特性模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(10): 1807-1813.
Cui G Y, Wang D Y, Ni S Z, et al. Model tests on bearing characteristics of steel fiber-reinforced concrete lining of weak surrounding rock tunnel[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(10): 1807-1813. (in Chinese)
- [3] 黄维,谢中识,杨永刚,等. 温度和应力下能源桩桩身加筋混凝土变形性质试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(7): 2491-2498.
Huang W, Xie Z S, Yang Y G, et al. Experimental study of deformation properties of reinforced concrete in energy piles under temperature and stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2491-2498. (in Chinese)
- [4] 徐松林,王鹏飞,赵坚,等. 基于三维Hopkinson杆的混凝土动态力学性能研究[J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 180-185.
Xu S L, Wang P F, Zhao J, et al. Dynamic behavior of concrete under static triaxial loading using 3D-Hopkinson bar[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 180-185. (in Chinese)
- [5] 宫凤强,李夕兵,叶洲元. 三轴 SHPB 岩石材料动力学特性试验研究的现状和发展趋势[J]. *科技导报*, 2009, 27(18): 106-111.
Gong F Q, Li X B, Ye Z Y. Experimental research progress of dynamic characteristics for rock materials on triaxial SHPB apparatus[J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(18): 106-111. (in Chinese)
- [6] 王春,唐礼忠,程露萍,等. 三维高静载频繁动态扰动时岩石损伤特性及本构模型[J]. *岩土力学*, 2017, 38(8): 2286-2296, 2305.
Wang C, Tang L Z, Cheng L P, et al. Damage characteristics and constitutive model of rock under threedimensional high static load and frequent dynamic disturbance[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(8): 2286-2296, 2305. (in Chinese)
- [7] 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 F Q, Li X B, Liu X L. 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. (in Chinese)
- [8] 刘志义,甘德清,于泽峰,等. 一维动静组合加载下磁铁矿石力学特性及破碎特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(S1): 2869-2880.
Liu Z Y, Gan D Q, Yu Z H, et al. Experimental study on mechanical properties and crushing characteristics of magnetite under one-dimensional static and dynamic combined loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(S1): 2869-2880.
- [9] 杜超超,温森,孔庆梅. 一维动静组合加载下复合岩样动态力学特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(21): 168-178, 206.
Du C C, Wen S, Kong Q M. Tests for dynamic mechanical properties of composite rock samples under 1-D dynamic-static combined loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(21): 168-178, 206. (in Chinese)
- [10] 高常辉,马芹永,马冬冬. 主动围压作用下水泥粉质黏土 SHPB 试验与分析[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(14): 162-167.
Gao C H, Ma Q Y, Ma D D. SHPB test and analysis on cemented silty clay under confining pressure conditions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(14): 162-167. (in Chinese)
- [11] 王伟,梁渲钰,张明涛,等. 动静组合加载下砂岩破坏机制及裂纹密度试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10): 2647-2658.
Wang W, Liang X Y, Zhang M T, et al. Experimental study on failure mechanism and crack density of sandstone under combined dynamic and static loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2647-2658. (in Chinese)
- [12] 李地元,高飞红,刘濛,等. 动静组合加载下含孔洞层状砂岩破坏机制探究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2127-2140.
Li D Y, Gao F H, Liu M, et al. Research on failure mechanism of stratified sandstone with pre-cracked hole under combined static-dynamic loads[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2127-2140. (in Chinese)
- [13] 左宇军,唐春安,朱万成,等. 动载荷作用下岩石破坏过程的数值试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(4): 887-892.
Zuo Y J, Tang C A, Zhu W C, et al. Numerical test on failure process of rock subjected to dynamic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 887-892. (in Chinese)
- [14] 袁伟,金解放,梁晨,等. 混凝土主动围压 SHPB 试验波形数值分析[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(7): 141-146.
Yuan W, Jin J F, Liang C, et al. Numerical analysis on waveforms in split Hopkinson pressure bar tests of concrete under active confining pressures[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2018, 35(7): 141-146. (in Chinese)

- [15] 刘德克, 李克钢, 吴勇, 等. 一维动静组合加载下岩石力学特性的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(5): 30-34.
Liu D K, Li K G, Wu Y, et al. Numerical simulation on the rock mechanical properties under one-dimensional static-dynamic coupling loading[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(5): 30-34. (in Chinese)
- [16] 陶明. 高应力岩体的动态加卸荷扰动特征与动力学机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
Tao M. Characteristic of the dynamic loading and unloading responses and dynamic mechanism of rocks under high initial stress[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [17] Yang J C, Liu K W, Li X D, et al. Stress initialization methods for dynamic numerical simulation of rock mass with high in-situ stress [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 3149-3162.
- [18] Zhao R, Tao M, Zhao H T, et al. Dynamics fracture characteristics of cylindrically-bored granodiorite rocks under different hole size and initial stress state[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 109: 102702.
- [19] 王晓雨, 李骞, 王伟, 等. 动静组合加载数值模拟砂岩损伤演化规律[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6248-6254.
Wang X Y, Li Q, Wang W, et al. Numerical simulation of damage evolution of sandstone under combined dynamic and static loading[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(15): 6248-6254. (in Chinese)
- [20] 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 F Q. Experimental study of rock mechanical properties under coupled static-dynamic loads and dynamic strength criterion[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [21] 谢立栋, 东兆星, 姜慧, 等. 早龄期混凝土动强度应变率系数的统计方法[J]. 兵工学报, 2021, 42(S1): 159-166.
Xie L D, Dong Z X, Jiang H, et al. Statistical method for strain rate coefficients of dynamic strength of early-age concrete[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(S1): 159-166. (in Chinese)
- [22] 周子龙, 李夕兵, 岩小明. 岩石 SHPB 测试中试样恒应变率变形的加载条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2445-2452.
Zhou Z L, Li X B, Yan X M. Loading condition for specimen deformation at constant strain rate in shpb test of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2445-2452. (in Chinese)
- [23] 王志航, 许金余, 王腾蛟, 等. 动静组合荷载下混凝土高温后的双轴动态力学性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021(2): 94-101.
Wang Z H, Xu J Y, Wang T J, et al. Research on biaxial dynamic mechanical properties of concrete after high temperature under combined static and dynamic loads[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021(2): 94-101. (in Chinese)
- [24] 任根茂, 吴昊, 方秦, 等. 普通混凝土 HJC 本构模型参数确定[J]. 振动与冲击, 2016, 35(18): 9-16.
Ren G M, Wu H, Fang Q, et al. Determinations of HJC constitutive model parameters for normal strength concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(18): 9-16. (in Chinese)
- [25] 吴赛, 赵均海, 王娟, 等. 基于砼 SHPB 试验数值分析的 HJC 模型参数研究[J]. 计算力学学报, 2015, 32(6): 789-795.
Wu S, Zhao J H, Wang J, et al. Study on parameters of HJC constitutive model based on numerical simulation of concrete SHPB test[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, 32(6): 789-795. (in Chinese)
- [26] 巫绪涛, 孙善飞, 李和平. 用 HJC 本构模型模拟混凝土 SHPB 实验[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2): 137-142.
Wu X T, Sun S F, Li H P. Numerical simulation of SHPB tests for concrete by using HJC model[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(2): 137-142. (in Chinese)
- [27] Li C L, Prikryl R, Nordlund E. The stress-strain behaviour of rock material related to fracture under compression[J]. Engineering Geology, 1998, 49(3/4): 293-302.
- [28] 任韦波, 许金余, 刘远飞, 等. 高温后玄武岩纤维混凝土冲击破碎分形特征[J]. 振动与冲击, 2014, 33(10): 167-171, 188.
Ren W B, Xu J Y, Liu Y F, et al. Fractal characteristics of fragments of basalt fiber reinforced concrete after elevated temperatures under impact loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(10): 167-171, 188. (in Chinese)
- [29] 任韦波, 许金余, 白二雷, 等. 高温后玄武岩纤维增强混凝土的动态力学特性[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 36-42.
Ren W B, Xu J Y, Bai E L, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete after elevated temperatures [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(1): 36-42. (in Chinese)