

文章编号:1674-9669(2017)04-0098-07
DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2017.04.017

围压下混凝土动态损伤与能量耗散特征数值分析

袁伟, 金解放, 梁晨, 王杰, 郭钟群, 何聪, 程昀

(江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:为了研究围压对混凝土材料冲击破坏过程中损伤演化和能量耗散的影响,基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,模拟不同冲击速度和围压级别下的混凝土 SHPB 实验.结果表明:在不同的冲击速度下,峰值应力均随着围压的提高线性增大,最大可以达到混凝土静态抗压强度的 3~4 倍.围压条件下混凝土的破坏形式为压剪破坏,试件的平均损伤度随围压的增大而非线性降低,相较于冲击速度,围压对损伤度的影响更弱.随着围压的提高,混凝土对应力波的透射能力增强,反射波的能量非线性降低,而透射能随着围压的增大近似线性增加,混凝土的耗能随着围压的增大而近似线性降低;在不同的入射能下,反射系数、透射系数和试件耗能的变化趋势是一致的.围压一定时,混凝土的损伤程度随入射能的增加线性增长;入射能一定时,试件损伤度随围压的增加而降低,变化幅度也降低.

关键词:混凝土;围压 SHPB;损伤;峰值应力;能量耗散

中图分类号:TD315.3 **文献标志码:**A

Numerical analysis of dynamic damage and energy dissipation characteristics of concrete under confining pressure

YUAN Wei, JIN Jiefang, LIANG Chen, WANG Jie, GUO Zhongqun, HE Cong, CHENG Yun

(School of Architectural and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to study the effect of confining pressure on damage evolution and energy dissipation of the failure process of concrete under impact, the SHPB experiments of concrete under different impact velocities and different level of confining pressures were simulated based on ANSYS/LS-DYNA finite element software. The results show that the peak stress increases linearly with the increase of confining pressure at different impact velocities, which can reach 3~4 times of the static compressive strength of concrete. Under the condition of confining pressure, the failure mode of concrete is compression-shear failure, and the average damage degree of the specimen decreases nonlinearly with the increase of confining pressure. Compared with the impact velocity, the influence of confining pressure on the damage degree is weaker. With the increase of confining pressure, the transmission capacity of the concrete is enhanced, and the reflected energy decreases nonlinearly, while the transmitted energy increases linearly. The energy dissipation of the concrete decreases linearly with the increasing of the confining pressure. On the other hand, the change trend of the reflection coefficients, transmission coefficients and the energy consumption of the specimen are consistent under different incident energy. When the incident energy is constant, damage degree of specimen decreases with the increasing of confining pressure, meanwhile, the variation range decreases as well.

Keywords: concrete; SHPB with confinement; damage; peak stress; energy dissipation

收稿日期:2016-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51664017);江西省教育厅科技项目(GJJ160616, GJJ14462);江西理工大学科研基金项目(NSFJ2014-G04)

通信作者:金解放(1977-),男,博士,副教授,主要从事岩石动力学及岩体稳定性分析方面的教学和科研工作, E-mail:jjf_chang@126.com.

近年来,地震灾害频发,导致建筑物损坏、倒塌,给人民的生命、财产造成了巨大的损失;而混凝土仍作为一种常用的建筑材料被广泛地应用到工程建(构)物中,并且一部分混凝土结构在正常工作时已处于围压作用之下,比如基桩、桥墩等。混凝土的力学特性与其所处应力环境密切相关^[1-2],基于此,开展围压条件下混凝土的动态力学特性研究十分必要。

目前,针对混凝土的动态力学行为,多集中开展温度作用、骨料组成、特殊混凝土方面的研究^[3-6],而针对不同应力环境下混凝土的动力性能,研究尚且不足。材料所处的预静载环境包括轴向静载和径向静载,也就是围压荷载;薛志刚等^[7]进行了主动和被动围压下水泥砂浆的动态压缩实验,对比分析了水泥砂浆在不同应力状态下的动态力学行为。张磊等^[8]基于自行研制的实验装置,进行了混凝土在围压条件下的冲击压缩实验,结果表明围压对混凝土的动态力学性能影响明显。彭刚等^[9]以孔隙水压为背景,研究了混凝土在围压下的动态力学性能,并考虑了应变速率对混凝土峰值应力的影响。随着研究的进一步深入,细观力学的方法被引入到混凝土的动态力学性能研究中^[10]。金浏等^[11]基于细观单元等效的方法,研究了混凝土的破坏行为。雷光宇等^[12]从细观力学数值模拟研究发现,不同应变速率下,预静载对混凝土的动压强度变化的影响不同,而静载水平不同时,混凝土的破坏形态也有差异。考虑到钢管混凝土在工程结构中的广泛应用,根据其遭受到被动围压作用的受力特点^[13-15],李祥龙、ZHANG H 等^[16-17]研究了钢制套筒被动围压下水泥混凝土材料的动态力学性能,表明混凝土在被动围压下延性、抗破坏能力得到加强。吴赛等^[18]也利用 LS-DYNA 软件模拟了被动围压条件下混凝土的动态压缩实验,结果表明数值模拟是有效可行的。以上研究均表明,预静载对混凝土的动态力学特性有重要的影响。

已有研究多集中于围压对混凝土的强度和变形能力的影响,而有关围压对混凝土损伤破坏模式和受动载冲击过程中能量耗散规律的影响研究未查询到相关报道。能量耗散是材料破坏的原动力,材料变形破坏可以看成是不同形式能量之间相互转化的结果;另一方面,研究材料的动态破坏,有助于认识其遭受动载冲击时的变形规律和破坏程度,进而采取加固措施,保证建筑物的使用安全。基于此,利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,模拟不同冲击速度和不同围压级别的混凝土 SHPB 实验,分析在一定冲击能下,围压对试件的峰值应力的影响规律,以及围压条件下混

凝土的动态损伤破坏模式;研究围压作用下混凝土试件的应力波透反射系数的变化规律,分析比较不同围压级别下试件损伤程度与入射能量的关系。研究结果有助于认识围压条件下混凝土冲击损伤破坏的能耗规律,为爆破拆除混凝土建(构)筑物工程和防灾减灾工程提供一定的参考。

1 有限元模型建立

1.1 材料模型及参数

在冲击过程中冲头、入射杆和透射杆只发生弹性变形,故均采用线弹性材料,材料参数: $\rho=7\ 800\text{ kg/m}^3$, $E=200\text{ GPa}$, $\nu=0.3$ 。混凝土材料采用 H-J-C 本构模型模拟,该模型是一种应变率相关的动态损伤本构,能够有效地模拟出混凝土、岩石类脆性材料在高应变率、大变形和高围压条件下的动力响应,其等效屈服强度是压力、应变率及损伤的函数,而压力是体积应变(包括压垮状态)的函数,损伤积累是塑性体积应变、等效塑性应变及压力的函数。针对混凝土、岩石类材料,状态方程分 3 段表述,如图 1 所示。

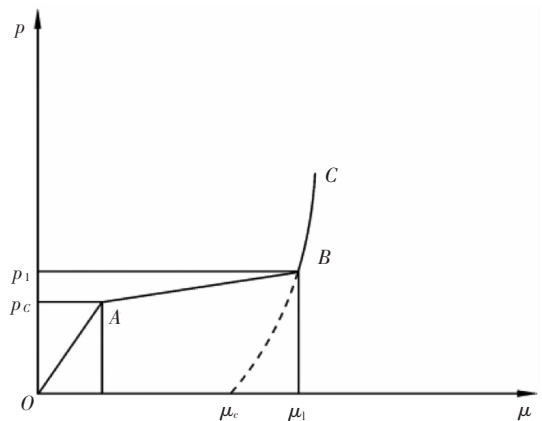


图1 H-J-C 模型状态方程曲线

Fig. 1 State equation curve of H-J-C model

第1阶段:线弹性变形阶段(OA段),此时方程满足 $p=K\mu$, K 为体积模量;

第2阶段:压实阶段(AB段),混凝土内部的孔隙被逐渐挤密,并开始产生塑性变形和损伤,此时方程满足 $p=K'\mu$, 其中 $K'=(p_1-p_c)/(\mu_1-\mu_c)$;

第3阶段:基体压缩阶段(BC段),该阶段试样的孔隙被完全压密,应力应变关系满足非线性,即 $p=K_1\mu+K_2\mu^2+K_3\mu^3$, 其中 K_1 、 K_2 、 K_3 分别为材料常数。

本模拟中模型参数取自文献^[18],参数单位制采用 m-kg-s,主要参数见表1,其余参数采用程序默认值。其中 ρ 、 G 为材料的密度和剪切弹性模量; S_{imax} 为

材料所能达到的最大标准化强度; $\varepsilon_{\min}$ 为材料最小塑性应变; p_c 和 μ_c 分别是单轴压缩试验时材料的压碎体积压力和压碎体积应变, p_1 和 μ_1 分别为压实压力和压实体积应变; K_1 、 K_2 和 K_3 为常数;通过对材料本构模型添加侵蚀失效关键字“MAT_ADD_EROSION”控制材料的失效破坏.

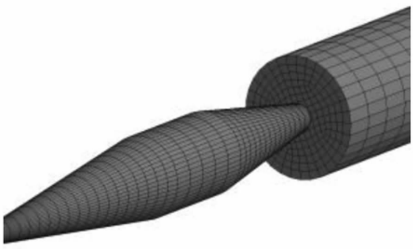
表 1 混凝土 H-J-C 模型参数
Table 1 Parameters of H-J-C model

ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	G /GPa	A	B	C	N	$S_{\max}$	D_1	D_2	p_c /MPa
2440	14.86	0.79	1.60	0.007	0.61	7.0	0.04	1.0	11.4
μ_c	p_1 /MPa	μ_1	T /MPa	K_1 /GPa	K_2 /GPa	K_3 /GPa	f_c /MPa	$\varepsilon_{\min}$	
0.001	800	0.10	3.63	85	-171	208	34.2	0.01	

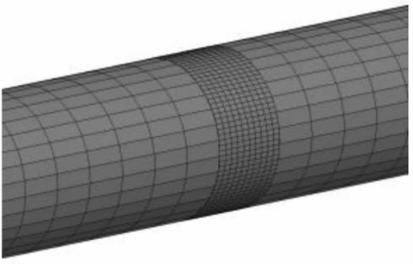
1.2 有限元模型的建立

模拟采用冲头撞击入射杆的方式加载,研究表明,半正弦波是混凝土、岩石类 SHPB 实验的理想加载波形^[19-20],可以消除波在传播过程中的弥散现象.因此采用中南大学李夕兵研制的异形冲头,以获得近似半正弦加载波形.由于单元的最小尺寸决定了计算时间步长,尺寸越小时间步长越长,计算所需的时间也更多,但计算的精度也越高,因此应在保证计算精度的前提下适当选择单元尺寸.依据 $\Phi 74\text{ mm}$ SHPB 装置的实际尺寸,采用 LS-DYNA 中的 solid164 单元建立冲头、入射杆、试件和透射杆的有限元模型.入射杆直径为 74 mm ,长 2.5 m ;透射杆直径 74 mm ,长 2 m ;试件的直径为 74 mm ,高 37 mm .采用映射网格划分方式,入射杆沿径向划分 16 份,长度方向 125 份,单元总数为 24 000;透射杆沿径向划分 16 份,长度方向 100 份,单元总数为 19 200;由于 H-J-C 模型已能够较好地模拟骨料、砂浆协同作用的混凝土材料力学特性,在建立有限元模型时未建立骨料模型,试件沿径向划分 48 份,长度方向 10 份,单元总数为 17 280;由于冲头几何形状的特殊性,为得到理想的半正弦波,其网格划分更为精细,单元总数为 22 932,有限元模型如图 2 所示.

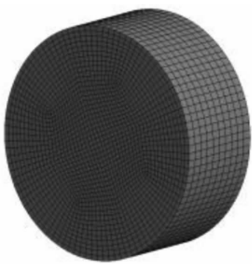
冲头和入射杆、入射杆和试件、试件与透射杆之间的接触均采用面-面接触;接触算法为罚函数算法,以降低漏渗效应,罚函数因子 k 取 1.0.研究表明,罚函数因子的选取对接触面处的应力波透反射影响较大,对于不同的网格划分情况,需通过模拟空冲试验确定合适的 k 值;针对本模拟的网格划分,经模



(a) 冲头与入射杆接触位置



(b) 试件与压杆接触位置



(c) 试件

图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element models

拟试验确定 k 取 1.0 时可以得到较为真实的结果.

实现主动围压施加的关键步骤包括:①将试件最外层单元定义成元组;②定义 σ_3-t 曲线,围压从 0 时刻开始定义,在入射波波头到达入射杆与试件的接触端面之前达到目标值,之后保持恒定,持续时间不小于压杆冲击作用时间;③根据网格划分与围压加载情况,调试出合适的罚函数因子 k .

2 模拟结果分析

2.1 应力波形图

基于上述围压的施加方法,在冲头速度分别为 15 m/s 、 20 m/s 、 23 m/s 时,进行了 7 组围压下混凝土的 SHPB 模拟实验,围压级别分别设为 3 MPa 、 6 MPa 、 9 MPa 、 12 MPa 、 15 MPa 、 18 MPa 、 21 MPa ,进行数值计算.利用后处理软件 LS-PREPOST 提取入射、反射和透射应力波形,入射杆和透射杆上波形提

取单元距离试件端面均为1 m. 图3所示为模拟得到的典型波形图.

从图3中可以看出,入射波近似为半正弦波,与实验的波形是类似的,说明建模的方法和网格的划分是有效的. 反射波和透射波相较于入射波在波形上发生了畸变,反射波出现了2个明显的峰值点,称为反射波的“双峰”现象^[21]. 在第1峰值之后试件内部应力达到均匀状态,随后拉应力继续增大,表明试件开始损伤,体积膨胀变形增大,直至破坏;第2峰值点的高度决定了试件的破坏程度;而透射波峰值点出现的时间与试件的应力均匀时间是一致的,随着试件损伤的发展,透射应力逐渐减小. 这也直观地反映了试件在动载作用下的响应情况.

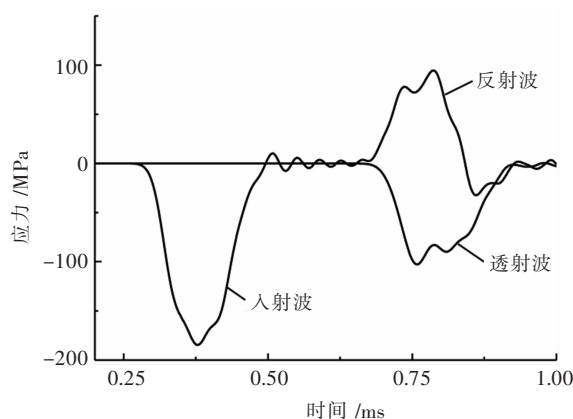


图3 入射杆、透射杆上应力波形 ($\sigma_3=9$ MPa)

Fig. 3 Stress waveform of incident bar and transmitted bar ($\sigma_3=9$ MPa)

2.2 围压对峰值应力的影响

试验中试件的峰值应力反映了混凝土在动载作用下的抗冲击能力,图4所示为不同的工况下混凝土试件的峰值应力随围压的变化规律.

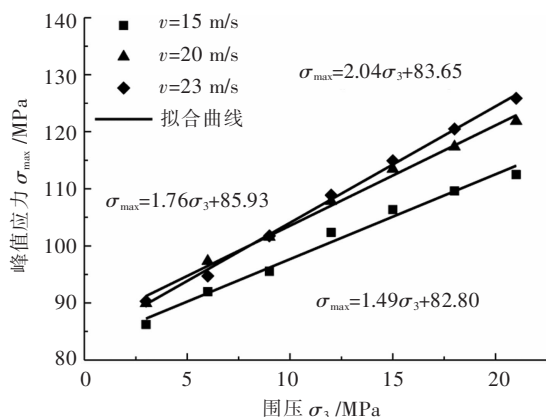


图4 不同工况下峰值应力的变化

Fig. 4 Changes of peak stress under different confining pressures and impact velocities

由图4可见,随着围压的提高,试件的峰值应力逐渐增大,在模拟的围压范围内,峰值应力与围压之间较好地满足线性关系;而在不同的冲击速度下,拟合曲线的斜率不相等,冲击速度越大,峰值应力也越大,最大甚至可以达到混凝土静态抗压强度的3~4倍,这与无围压 SHPB 的情形一致. 在相同的应力脉冲作用下,混凝土试件会发生轴向和横向的变形,而由于主动围压约束了试件的横向变形,导致试件的裂纹扩展更加困难,这样入射应力波就更多地在试件内部多次来回反射,那么试件能达到的最大均匀应力就越大,也说明了试件的损伤程度较低. 而在相同的围压条件下,随着冲击速度的增加,入射应力波幅值也越来越大,这对试件造成的破坏也越严重,因此入射波中被反射的部分也越多,试件能够达到的最大平均应力也就越小.

3 围压下混凝土的损伤破坏

围压 SHPB 试验装置中,由于试件被橡皮套包裹,难于观测岩石试件的破坏过程,并且在试件未发生表面裂纹的情况下难于直观判断其损伤程度;另一方面,ANSYS/LS-DYNA 是基于连续介质力学的有限元计算软件,难于模拟试件破碎后的飞溅效果^[22],但数值模拟可以弥补实验的不足,采用的 H-J-C 模型可以真实地模拟出混凝土试件在冲击载荷作用下的损伤演化过程. 因而,在试件不发生碎裂的条件下,可以通过损伤度 D 的大小及分布情况判断试件的破坏程度及裂纹发展情况. $D=1$ 的区域为损伤失效区, $0<D<1$ 的区域为裂隙区, $D=0$ 即为完整的弹性区. 利用后处理软件 LS-PREPOST 可以得到试件的损伤度 D 的分布云图,如图5所示,其表示在围压为9 MPa,冲头撞击速度 v 分别为20 m/s、23 m/s、26 m/s 时试件的损伤分布情况.

由图5可以看出,围压条件下,随着冲击速度的增加,试件的损伤程度逐渐加剧, $v=20$ m/s 时,试件的端部边缘出现碎块的剥落,但是试件的完整性较好;而 $v=23$ m/s 时,试件端部边缘的碎块剥落情况更加严重,其整体的损伤度更大,同时可以清楚地看到,在试件的表面出现2条与试件轴向成一定角度的损伤区域,如浅色线所示区域;继续提高冲头的撞击速度至26 m/s,试件出现灾难性破坏,碎成几个较大的块体,并且碎块可以拼成锥体,由此说明,试件的破裂面与轴向成一定的角度,围压条件下混凝土的破坏符合压剪破坏的特点,这与无围压时的拉伸破坏模式不同.

然而,在混凝土构件遭受动载冲击时,往往不会发生毁灭性破坏,但是需要对其能否继续正常工作做出判断,这就要求预测其整体损伤度. 由于混凝土是

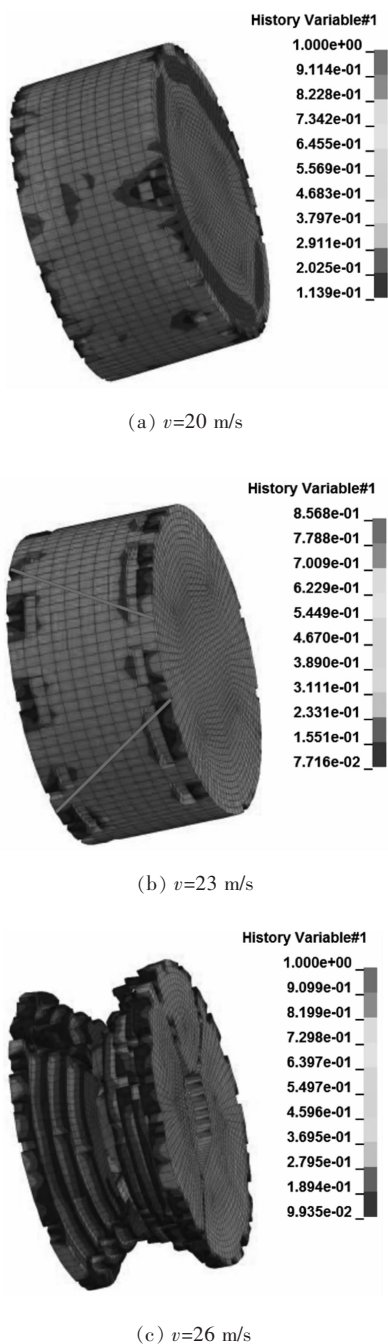


图5 不同冲击速度下试件的损伤云图($\sigma_3=9$ MPa)

Fig. 5 Damage fringe of specimens under different impact velocities and 9 MPa confining pressure

一种各向异性材料,在载荷作用下其裂隙发展具有不均匀的特点,因此要精确描述其损伤程度具有很大困难,众多学者^[23-24]也从不同的角度定义损伤变量,以研究此类材料的动力响应及破坏机理。

文中采用平均损伤度参数来衡量混凝土损伤破坏程度.定义试件的平均损伤度为各计算单元的损伤值之和与单元数的比值,即

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (1)$$

其中: $\bar{D}$ 为试件的平均损伤度; D_i 为第*i*个单元的计算损伤度; n 为试件所划分的单元总数。

图6所示为混凝土试件的平均损伤度 $\bar{D}$ 与围压 σ_3 的关系,可见在相同的冲击速度下,随着围压的增大,试件的平均损伤度呈非线性变化,在较小围压级别下,试件的损伤减小幅度较大,而在较高围压下试件的损伤度变化幅度较小.在相同的围压条件下,随着冲击速度的增加,试件的损伤程度逐渐加剧,冲击速度较小时,围压对试件损伤度的影响程度也较小,反之,冲击速度越大,围压对损伤的减弱越明显,但是高能冲击总是比低能冲击对试件的损伤大,说明试件的损伤对围压变化敏感程度较冲击能的变化更弱。

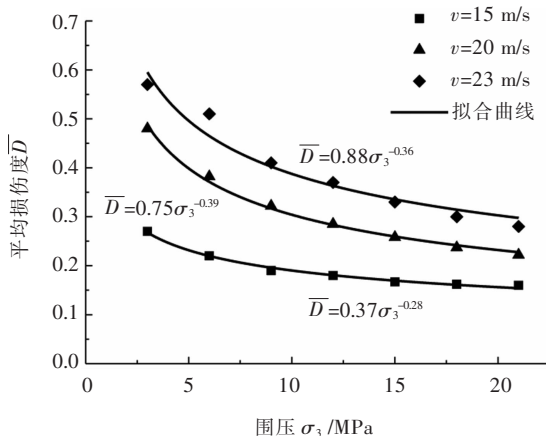


图6 试件平均损伤度与围压的关系

Fig. 6 Relation between average degree of damage and confining pressure

4 围压下混凝土冲击损伤能量特征

4.1 围压 SHPB 实验的能量组成及变化

在 SHPB 实验中,系统的总能量由冲头的动能提供,冲头动能转化为入射杆上入射波的能量,在试件与压杆接触位置处,入射能一部分传入试件,一部分转化为入射杆中的反射能;传入试件的能量并不能完全被混凝土吸收,一部分用于塑性变形、裂纹发展、碎块的动能,均为不可恢复的能量损耗;而另一部分则传入透射杆,转化为透射能.依据一维应力波理论,入射能 W_i 、反射能 W_r 、透射能 W_t 可按照式(2)计算

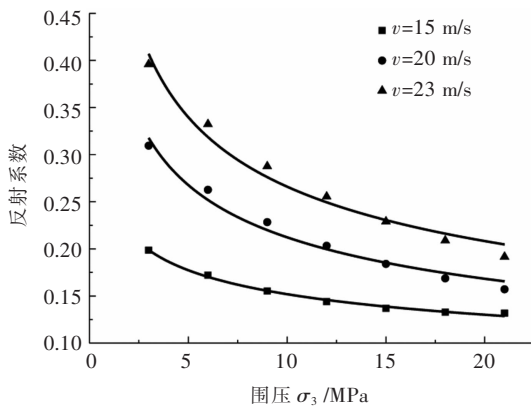
$$\begin{cases} W_i = \frac{A_0 c}{E} \int_0^{\tau} \sigma_i^2(t) dt \\ W_r = \frac{A_0 c}{E} \int_0^{\tau} \sigma_r^2(t) dt \\ W_t = \frac{A_0 c}{E} \int_0^{\tau} \sigma_t^2(t) dt \end{cases} \quad (2)$$

其中, E 为压杆的弹性模量. 不考虑试件与压杆接触界面的能量损失和热量损失, 入射能全部转化为反射能、透射能和试件的耗能, 则试件的耗能

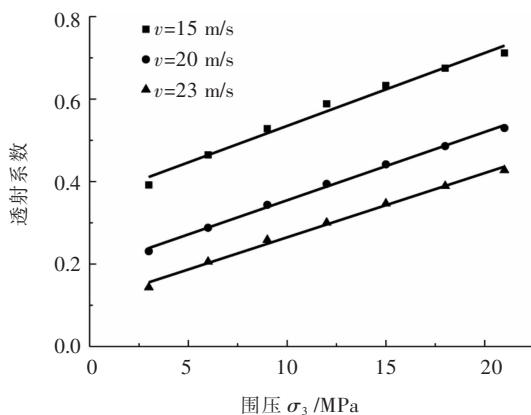
$$W_s = W_i - W_r - W_t \quad (3)$$

在动载冲击下, 以应力波反射系数和透射系数来表征混凝土试件对应力波的反射和透射能力, 反射系数即为反射能与入射能之比, 同理, 透射系数为透射能与入射能之比. 反射系数越大, 透射系数越小, 表示试件的完整性越差, 损伤破坏程度越严重.

图7所示为模拟得到的不同工况下混凝土试件的透、反射系数, 可以看出, 在相同围压下, 冲击速度越大, 试件的反射系数越大, 透射系数越小; 而在同样的冲击速度下, 随着围压的增大, 试件的反射系数减小, 透射系数增大, 表明试件的损伤程度降低, 而完整性越来越好. 随着试件所受围压的增大, 反射能逐渐减小, 在围压较小时, 反射系数的减小幅度较大; 而围压较高时, 反射系数的减小幅度逐渐减小, 即反射系数与围压之间呈现非线性关系. 透射系数随着围压的增大而增大, 且近似线性变化, 说明混凝土试件的透射能力得到增强. 由于混凝土是一种孔隙率较高



(a) 反射系数



(b) 透射系数

图7 不同工况下试件的应力波透反射系数

Fig. 7 Coefficients of reflection and transmission

的材料, 在围压较小时, 孔隙的闭合度对围压的改变较为敏感, 很小的围压变化都会导致试件的孔隙率、密度的改变, 进而导致材料的波阻抗发生明显地改变, 因此反射系数的变化幅度也较为明显; 当围压达到一定级别, 混凝土的孔隙闭合程度较高, 孔隙率对围压改变的敏感度降低, 波阻抗的变化也趋缓, 因此反射系数的变化趋势也较为平缓.

而试件的耗能与反射能、透射能的变化趋势不同, 图8所示为不同围压和冲击速度下试件的耗能情况, 在相同的围压条件下, 混凝土的耗能随着冲击速度的增大而增大, 即试件的破坏程度逐渐加剧; 而在冲击速度相等, 即入射能一定的情况下, 随着围压的增大, 试件所消耗的能量逐渐减小. 分析认为, 随着围压的增加, 混凝土试件受到的变形约束作用逐渐增大, 在应力脉冲的作用下, 其横向变形受到限制, 裂纹的萌生、发展越来越困难, 由此消耗的能量也降低, 而大部分的能量则以透射能的形式进入透射杆.

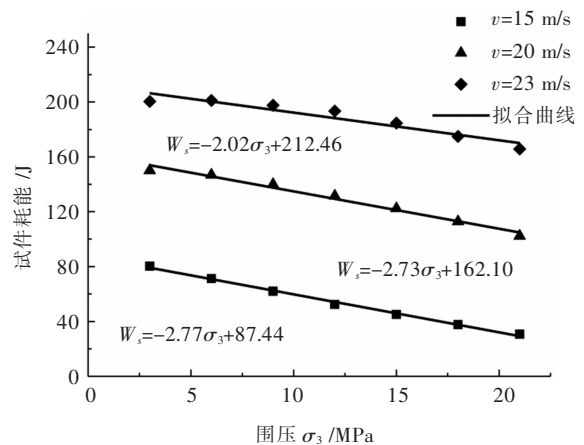


图8 不同工况下试件耗能规律

Fig. 8 Energy dissipation of concrete species under various confinements and impact velocities

4.2 围压条件下混凝土损伤度与入射能的关系

SHPB 试验中的入射能相当于地震、爆破等冲击荷载的能量, 试件的损伤度表征了混凝土在动载冲击下的破坏程度, 研究二者之间的关系可以为评估处于围压下的混凝土结构物在遭受动载冲击时的破坏程度提供一定的参考.

图9描绘了在不同围压条件下, 混凝土试件冲击损伤度与系统入射能之间的关系, 从图9中可以看出: 围压条件下, 试件的损伤程度与入射能之间近似满足线性关系, 围压相同时, 试件的损伤度随着入射能的增加而增大; 而围压值不同时, 拟合曲线的斜率不同, 并且随着围压的增大, 曲线的斜率逐渐减小, 并且斜率的变化幅度也在减小. 如前所述, 由于围压约束了试件的

变形,其损伤发展受到限制,因此达到相同的损伤值时所需要的能量更大。另一方面,拟合曲线斜率的变化幅度减小说明随着围压的增大,试件的损伤变化趋于平缓,即使继续增大围压,对混凝土的损伤减弱作用也不明显,并有可能对混凝土造成初始的损伤裂缝。因此,工程上仅仅靠提高增大围压值,来提高混凝土的抗冲击能力是不合理的;而在爆破拆除混凝土结构物时,应根据结构物的实际应力状态及应力大小,合理设计爆破装药量,比如《水工建筑物岩石基础开挖工程技术规范》(SL47-94)中规定的判定岩体受到爆炸损伤破坏对应的损伤阈值 $D_{cr} = 0.19$,假如混凝土的损伤阈值也是这个值,如图9中虚线所示,则构件所受的围压越大,则爆破时所需的能量越小,为避免对周围建筑物造成损害,应该根据所需实际能量合理设计装药量,以达到经济节约、安全高效的目的。

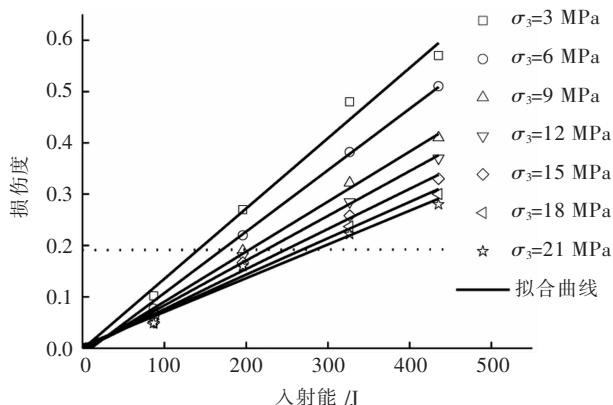


图9 不同围压下试件损伤度与入射能的关系

Fig. 9 Relation between average degree of specimen and incident energy

5 结论

基于 ANSYSLS-DYNA 有限元软件,数值模拟了具有围压的混凝土的 SHPB 实验,得到的主要结论如下:

1) 围压条件下,混凝土试件的峰值应力随着围压的增加线性增大,最大可以达到混凝土静态抗压强度的 3~4 倍。

2) 与无围压条件不同,主动围压下混凝土的破坏模式为压剪破坏。随着围压的增大,试件的损伤度非线性降低,但混凝土损伤对冲击速度的变化更加敏感。

3) 在系统入射能量不变时,随着围压的增大,混凝土对应力波的反射能减弱,透射能力增强,同时其自身耗能也在近似线性减小。

4) 相同围压条件下,混凝土的损伤度与冲击能近似满足线性关系,随着入射能的增加,试件的损伤程度加剧;随着围压的增大,试件发生相同损伤时所需

要的冲击能量增加,而围压较高时,这种变化趋缓,说明围压对试件变形的限制作用是有限的。

参考文献:

- [1] 李青松,徐进,熊益博,等.混凝土强度与变形特性的围压效应试验研究[J].建筑结构,2011,41(5):85-88.
- [2] 陈宗平,陈宇良,徐金俊,等.多轴受力状态下再生混凝土的破坏准则及应力-应变本构关系研究[J].土木工程学报,2015,48(12):23-33.
- [3] 张亚栋,邹宾,田杨,等.冻融循环对混凝土静动力特性的影响[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2017,18(1):1-8.
- [4] 梁书峰,刘殿书,李洪超,等.高温后混凝土动态力学性能时间效应试验[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(4):392-397.
- [5] 韩李斌,杨黎明.泡沫混凝土动态力学性能及破坏形式[J].宁波大学学报(理工版),2017,30(1):68-72.
- [6] 朱靖塞,许金余,白二雷,等.复合纳米材料对混凝土动态力学性能的影响[J].复合材料学报,2016(3):597-605.
- [7] 薛志刚,胡时胜.水泥砂浆在围压下的动态力学性能[J].工程力学,2008,25(12):184-188.
- [8] 张磊,何翔,王晓峰,等.混凝土恒定围压下冲击加载实验装置研制[J].振动与冲击,2015,34(22):24-27.
- [9] 彭刚,王乾峰,梁春华.有压孔隙水环境中的混凝土动态抗压性能研究[J].土木工程学报,2015,48(1):11-18.
- [10] 杜修力,金浏.细观分析方法在混凝土物理/力学性质研究方面的应用[J].水利学报,2016,47(3):355-371.
- [11] 金浏,杜修力.基于细观单元等效化方法的混凝土动态破坏行为分析[J].工程力学,2015,32(4):33-40.
- [12] 雷光宇,韩霖昌,党发宁,等.预静载对细观混凝土动态力学特性的数值试验研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):55-58.
- [13] 别雪梦,李召,管文强,等.快速加载下钢管混凝土柱动力性能数值模拟[J].混凝土,2016(8):27-31.
- [14] 惠兴田,王群.邵寨煤矿立井井壁支护方法的研究[J].煤炭技术,2017,36(1):22-23.
- [15] 胡昌明,韩林海.圆形钢管混凝土叠合构件抗冲击性能试验研究[J].土木工程学报,2016,49(10):11-17.
- [16] 李祥龙,刘殿书,冯明德,等.钢质套筒被动围压混凝土材料的冲击动态力学性能[J].爆炸与冲击,2009,29(5):463-467.
- [17] ZHANG H, LI F, GAO Y W. Study on the dynamic performance of asphalt concrete under passive confined pressure[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 2031(226):173-178.
- [18] 吴赛,赵均海,李楠,等.被动围压混凝土的动态力学性能研究[J].应用力学学报,2015,32(6):992-998.
- [19] 周子龙,李夕兵,赵国彦,等.岩石类 SHPB 实验理想加载波形的三维数值分析[J].矿冶工程,2005,25(3):18-20.
- [20] 李夕兵,古德生,赖海辉.冲击荷载下岩石动态应力-应变全图测试中的合理加载波形[J].爆炸与冲击,1993,13(2):125-130.
- [21] 吕太洪,陈小伟,陈刚.基于混凝土试件 SHPB 实验的波形特征分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2016,17(4):345-349.
- [22] 潘城,赵光明,孟祥瑞.爆炸荷载作用下围岩累积损伤效应的数值分析[J].爆破,2016,33(1):30-33.
- [23] 金解放,钟海兵,吴越,等.静载荷与循环冲击作用下岩石损伤变量定义方法的选择[J].有色金属科学与工程,2013,4(4):85-90.
- [24] 何聪,金解放,周学进,等.静载荷与循环冲击组合作用下岩石损伤本构模型研究[J].有色金属科学与工程,2016,7(4):114-120.