

陶粒混凝土冲击损伤演化的三维数值模拟

王 甲, 肖圣哲, 邱 欣, 陈江瑛*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了研究陶粒混凝土在冲击载荷下的损伤演化规律, 利用蒙特卡洛随机数和背景网格建模方法, 建立了陶粒混凝土的三维数值模型, 模拟了冲击载荷下陶粒混凝土的损伤演化过程. 研究表明: 冲击载荷下陶粒混凝土的细观损伤演化速度随着陶粒体积分数的增加和加载脉冲的增加而增加. 细观数值模拟还显示了陶粒混凝土的破坏过程, 即损伤演化从陶粒骨料开始, 之后向砂浆基体延伸扩展.

关键词: 陶粒混凝土; 细观损伤; 数值模拟; 冲击

中图分类号: TU528.2; O242

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 06-0059-07

混凝土材料的力学性能及损伤演化规律一直是人们关注的重点^[1-6]. 陶粒混凝土作为一种新型的轻质建筑材料, 在工程领域得到了越来越广泛的应用, 研究人员从实验和数值模拟等方面对其开展了力学性能及相关的研究. 刘宗辉等^[7]基于声发射定位技术, 从细观上研究了静态压缩载荷下, 页岩陶粒混凝土内部的损伤演化规律, 分析了混凝土裂纹的萌生、发展、贯通的演化规律. 施德胜^[8]、施冠银^[9]研究了陶粒体积分数和冻融循环条件对陶粒混凝土动态力学性能的影响. 邱欣等^[10]首次采用分离式Hopkinson束杆设备对大尺寸的陶粒混凝土试样的宏观力学性能及损伤演化规律进行了探讨. 从已有的相关研究看, 关于普通混凝土动态力学性能与材料损伤演化的研究较多^[3-6, 10-17], 从宏观到细观, 从实验、理论到数值模拟, 而陶粒混凝土的动态力学性能研究则相对较少, 特别是冲击损伤演化的三维数值模拟鲜有报道. 通常认为材料的破坏是其内部细观损伤演化的结果, 陶粒混凝土的细观损伤研究可以采用实验方法, 也可用数值模拟方法. 鉴于目前细观力学在实验上没有特别有效的观测手段, 本文采用数值模拟方法研究其损伤演化的规律.

在混凝土材料的动态性能研究方面, Kolsky创建的 Hopkinson 技术已成为研究混凝土应变率效应的有效手段, 并得到广泛应用^[11-12]. 分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)技术应用需要满足两个基本假定, 即一维应力假定和均匀性假定. 为了避免使用传统 SHPB 单杆研究大尺寸试样时可能出现的横向惯性效应, 宁波大学在欧盟 ISPR 联合研究中心开发的捆绑式 Hopkinson 压杆^[15]基础上, 开发了卧式 SHPB 束杆试验装置, 并首次进行了大尺寸陶粒混凝土试样的冲击压缩试验, 得到了相应的宏观力学性能^[10].

参考已有的研究方法^[16-17], 本文运用蒙特卡洛随机数方法和背景网格建模方法, 使用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 建立了陶粒混凝土的三维数值细观模型. 通过陶粒混凝土在 SHPB 束杆冲击载荷下的应力波脉冲信号、试样应力应变曲线以及裂纹的产生、发展和贯穿等规律的模拟, 研究了冲击载荷作用下陶粒混凝土的细观损伤演化规律.

1 三维计算模型的建立

1.1 试样模型的建立

将陶粒混凝土简化为由砂浆和陶粒骨料构成

收稿日期: 2017-04-19.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11272165, 11572163).

第一作者: 王甲(1989-), 男, 安徽亳州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: wangjia2199@163.com

*通信作者: 陈江瑛(1964-), 女, 博士/教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: chenjiangying@nbu.edu.cn

的二相复合材料. 首先利用蒙特卡洛随机数方法生成陶粒混凝土试样的空间几何模型, 再利用“背景网格”方法建立陶粒混凝土试样的三维细观模型(图1和图2).

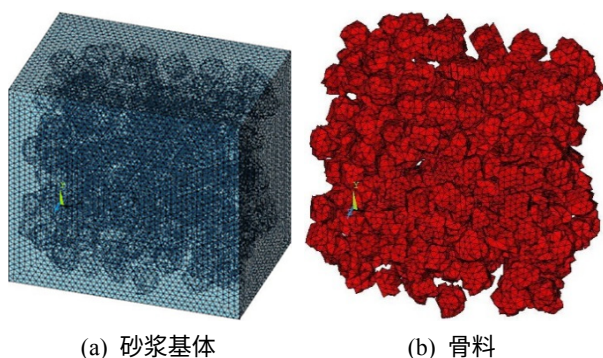


图1 15%陶粒含量试样的细观模型

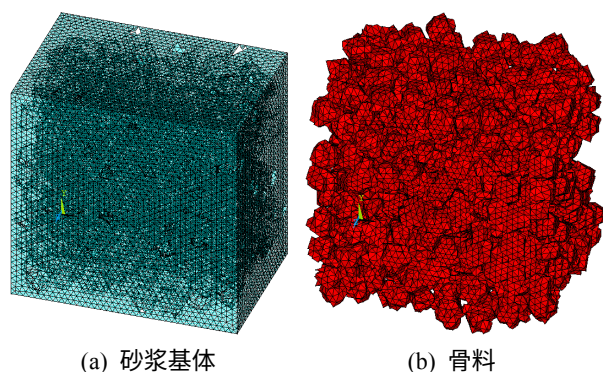


图2 45%陶粒含量试样的细观模型

1.2 束杆模型的建立

陶粒混凝土冲击压缩实验在SHPB束杆装置上进行, 装置如图3所示. 该装置的入射、透射压杆分别由5行×5列共25根铝质方杆构成入射束杆和透射束杆, 相应的小单杆尺寸分别为3 cm×3 cm×150 cm与3 cm×3 cm×100 cm, 各单杆间隙1 mm, 可用于贴应变片, 采集杆中的应力波信号. 尺寸为150 mm×150 mm×100 mm的陶粒混凝土试样置于入射束杆和透射束杆之间. 根据SHPB三波法处理冲击试验所采集到的信号, 得出试样的应力应变曲线.

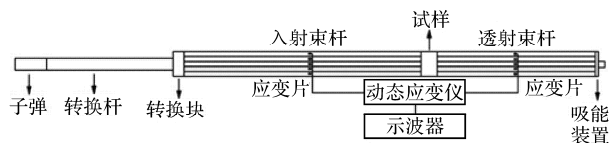


图3 SHPB束杆装置示意图

数值仿真中 SHPB束杆装置采用的模型省略入射杆前端的子弹、转换杆和转换块, 简化的有限

元几何模型如图4所示. 采用在入射杆一端直接加载梯形应力波脉冲方式. 其中上升沿和下降沿时长均为80 μs , 一个脉冲时长为240 μs . 在建模过程中, 入射束杆和透射束杆均采用 ANSYS/LS-DYNA 软件中的 3D_Solid164 单元, 划分成六面体单元, 单元尺寸为10 mm. 在对试样网格划分时, 参考已有的研究结果^[18], 在确保试样的网格尺寸不会对模拟结果产生较大影响的前提下, 试样模型采用 3D_Solid168 单元划分成四面体单元, 单元尺寸为4 mm.

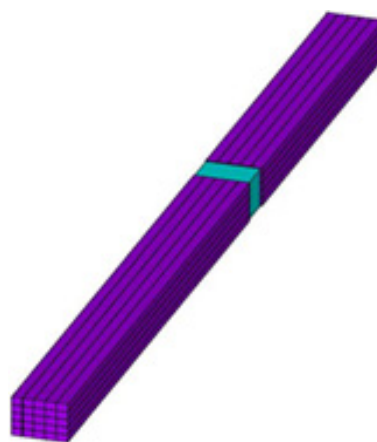


图4 束杆装置简化几何模型

试件与入、透射束杆之间采用面面自动接触, 接触算法采用罚函数接触算法以减少沙漏效应. 对骨料添加单元破坏判据关键字“*MAT_ADD_EROSION”, 模拟试样在冲击载荷作用下裂纹的产生和发展. 3D_Solid168单元带有自适应网格功能, 因此可通过控制网格细化程度来保证计算能够正常进行, 计算采用自动步长.

2 材料本构模型及参数

2.1 铝质束杆本构模型及参数

入射杆和透射杆为均质超硬铝材料, 采用线弹性模型, 密度 $\rho=2800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量 $E=71 \text{ GPa}$, 泊松比 $\lambda=0.33$.

2.2 砂浆基体本构模型及参数

对于混凝土类应变率敏感材料, 由于HJC (Holmquist-Johnson-Cook)等效强度模型考虑了应变率效应、静水压力和材料损伤对屈服应力的影响, 可以较好地描述混凝土类材料在高速变形过程中产生的损伤、破碎及层裂等行为, 已被广泛应用于

高速撞击和侵彻等问题的模拟^[13-14]。因此, 本研究也采用HJC模型作为砂浆基体的本构模型。

HJC等效强度模型的屈服面和损伤累积描述如下^[14]:

$$\frac{\sigma_b}{f_C} = [A(1 - D) + B(\frac{P}{f_C})^n][1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}], \quad (1)$$

式中: σ_b 为真实等效强度; P 为静水压力; f_C 为准静态单轴抗压强度; $\dot{\epsilon}$ 为真实应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; A, B, C, n 为材料常数; D 为损伤度, 定义为损伤体积所占比例。考虑等效塑性应变和塑性体积应变引起的损伤, 可表达为:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f}, \quad (2)$$

式中: $\Delta \epsilon_p, \Delta \mu_p$ 为等效塑性应变增量和等效体积应变增量; ϵ_p^f, μ_p^f 为静水压力 P 下破碎的等效塑性应变和塑性体积应变。

通过对陶粒混凝土试样进行物理参数测定、静压试验和公式计算确定材料的部分基本参数和压力参数。为使计算结果更好地吻合试验结果, 参考文献[13-14], 对 HJC 模型中参数 A, B, C, n 进行拟合, 其他参数采用初始值^[13], 最终使用的 HJC 模型参数见表 1。

表 1 HJC 模型参数

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G/Pa	A	B	C	n	f_C/Pa	T/Pa
2 154	12.92e9	0.71	1.74	0.007	0.81	62.9e6	4.92e6
$\dot{\epsilon}_0$	EFMIN	SFMAX	PC/Pa	μ_p^f	PL/Pa	UL	D1
1e-6	0.004	7.0	20.97e6	0.001 6	0.72e9	0.06	0.04
$D2$	$K1/\text{Pa}$	$K2/\text{Pa}$	$K3/\text{Pa}$	FS			
1.0	85e9	-171e9	208e9	0.004			

2.3 陶粒骨料本构模型及参数

模拟中骨料陶粒采用线弹性损伤模型^[17]。由试验测得的陶粒骨料密度 $\rho=878 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 由文献[19]的经验公式求得陶粒的弹性模量 $E=8.17 \text{ GPa}$, 泊松比 $\lambda=0.25$ 。

3 数值模拟结果及分析

3.1 模拟应力应变曲线与试验对比

图 5 为试样的陶粒体积分数为 15% 时, 60 MPa 应力波脉冲下模拟重构的陶粒混凝土应力应变曲

线与试验结果的对比。图 5 显示, 模拟重构的试样应力应变曲线与试验结果整体趋势吻合较好, 但模拟的应力应变曲线在对应试验曲线的平台拐点起始前段, 出现一个先降后升的阶段, 与试验结果有一定分歧。分析其原因主要是: 模拟时为了得到陶粒混凝土的损伤演化过程, 采用了删除失效单元的形式, 此时陶粒骨料单元因失效被删除, 造成能量和质量的损失; 同时在试样内部形成空洞, 增加了波阻抗, 使得透射波降低。后期因应力波脉冲的继续增加, 且陶粒骨料失效已达最大, 不再引起能量和质量的快速损失, 使得应力波通过砂浆基体传播到透射杆, 因此三波法处理出来的应力应变曲线再次上升。而实际试验中由于结构原因, 试样内部损伤失效产生的破碎部分还会保持在原位, 具有一定的承载能力, 应力波脉冲还可以继续传播。这是模拟与试验应力应变曲线产生分歧的主要原因。李耀等^[13]也曾发现上述现象。

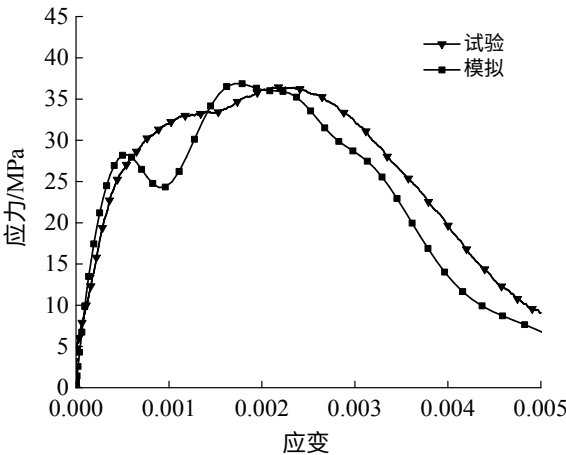


图 5 模拟应力应变曲线与试验结果的对比(15%, 60 MPa)

3.2 模拟试样各组分质量损失

由于现有的有限元都是基于连续介质力学, 模拟试样出现裂纹会产生不连续, 导致无法计算。因此, 为了模拟试样裂纹的发展, 目前大多数学者采用删除失效单元形式来实现。虽然该方法会造成试样的质量损失, 但这也是模拟中能在保证得到较好计算结果的同时得到试样裂纹的最好方法, 且该方法应用简单。

本模拟中砂浆基体采用 HJC 模型, 骨料采用破坏判据关键字 “*MAT_ADD_EROSION”, 都是以删除失效单元的方式来模拟裂纹的产生和发展。

虽然模拟试样裂纹产生和发展会造成试样各组分的质量损失,但可以用来表征试样整体及试样各分组的损伤过程。

图6为15%体积分数陶粒混凝土试样在60 MPa应力波脉冲下的砂浆、陶粒以及试样整体因单元失效删除造成的质量变化(其中应力波脉冲从入射杆打击端传播到试样的时间约为300 μs)。从图6可以看出,首先是陶粒骨料单元删除导致质量的

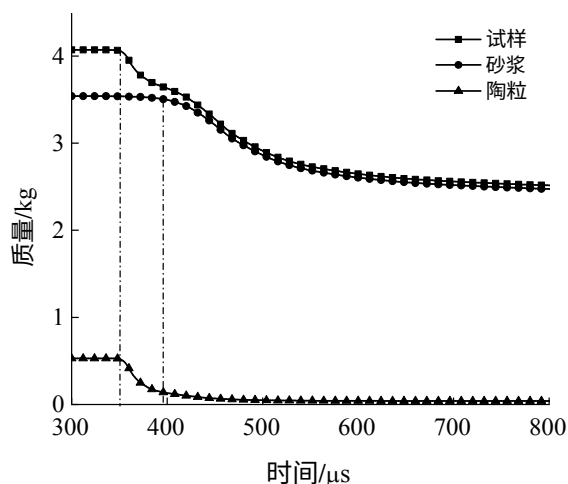


图6 质量变化曲线(15%, 60 MPa)

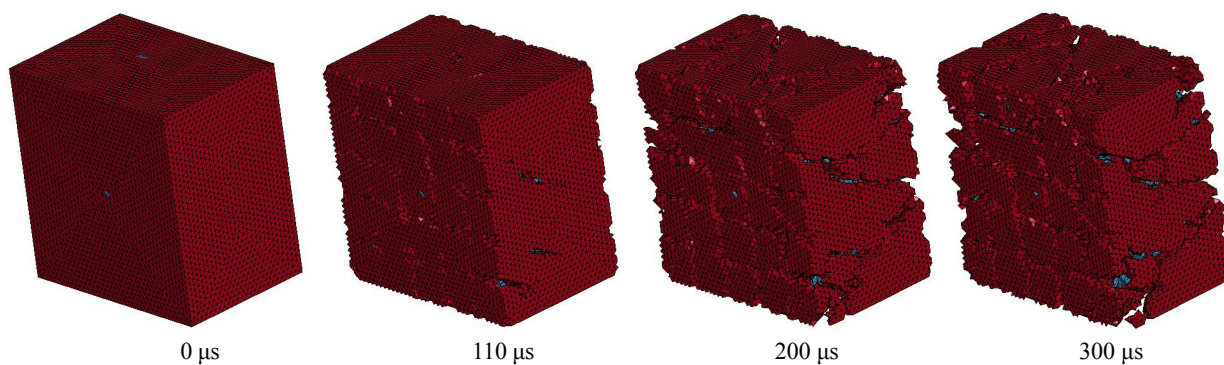


图7 模拟损伤破坏过程(15%, 60 MPa)

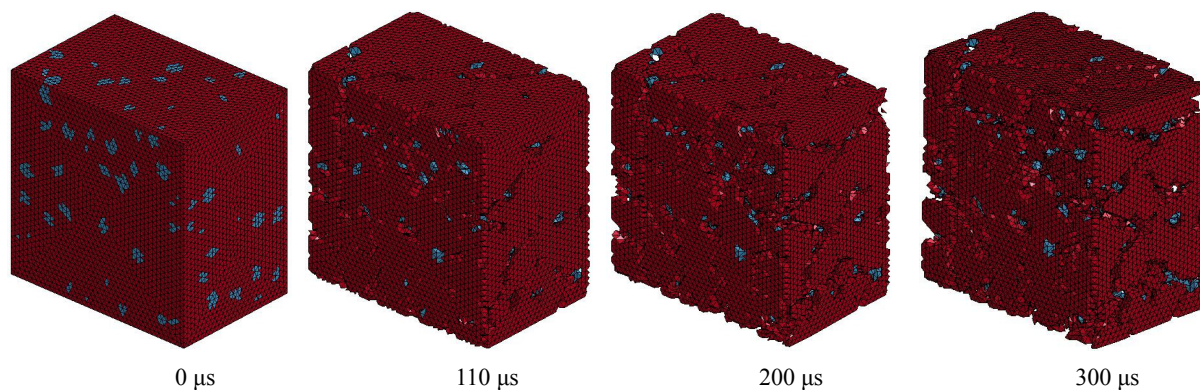


图8 模拟损伤破坏过程(45%, 60 MPa)

减少使试样整体质量降低;当陶粒骨料失效达到70%~80%时,砂浆基体单元才开始失效;之后质量的减少主要是砂浆基体贡献的。

3.3 试样的损伤演化分析

3.3.1 模拟宏观失效与试验对比

在60 MPa应力波脉冲幅值下,15%和45%体积分数的陶粒混凝土试样模拟的动态损伤过程如图7和图8所示。图9为45%体积分数的陶粒混凝土试样在60 MPa应力波脉冲下高速摄影仪记录的试验动态损伤过程。从图7~图9可以看到,模拟与高速摄影仪观测到的裂纹产生位置和扩展过程基本吻合。从模拟得到的试样表面应力分布,模拟和试验中得到的裂纹发展路径可以看出,动载下陶粒混凝土的宏观失效是由于拉剪应力造成的。

试验中高速摄影仪观测到陶粒混凝土试样在冲击载荷作用下的宏观损伤情况,与模拟得到的宏观损伤结果进行对比分析,发现随着冲击加载时间的推移,陶粒混凝土损伤破坏发展的规律是一致的,但实验记录时间间隔偏大,可能的原因是试验中材料损伤是在原子/分子尺度进行(或发展),而模拟中是以单元为最小尺度发展,因此模拟反

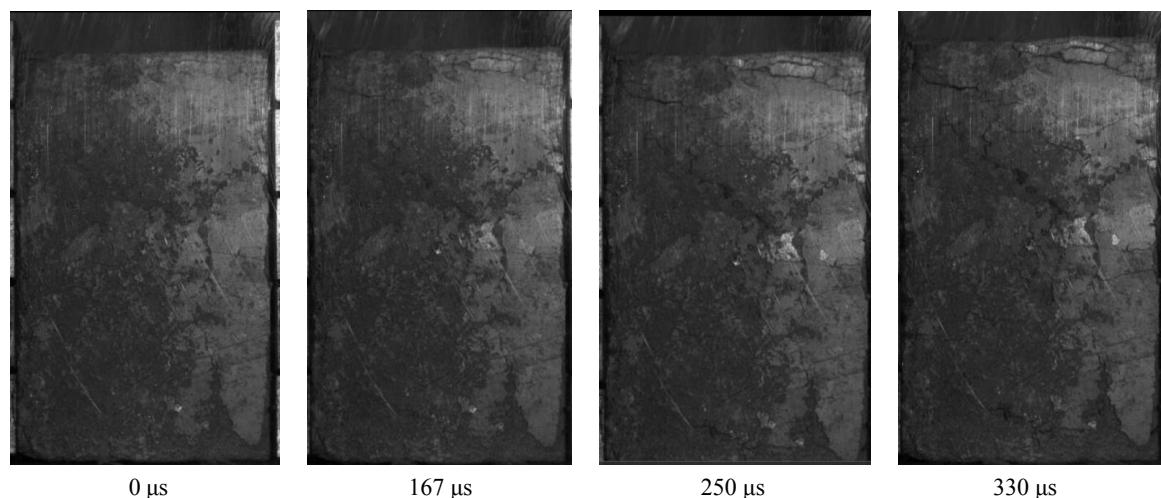


图9 试验损伤破坏过程(45%, 60 MPa)

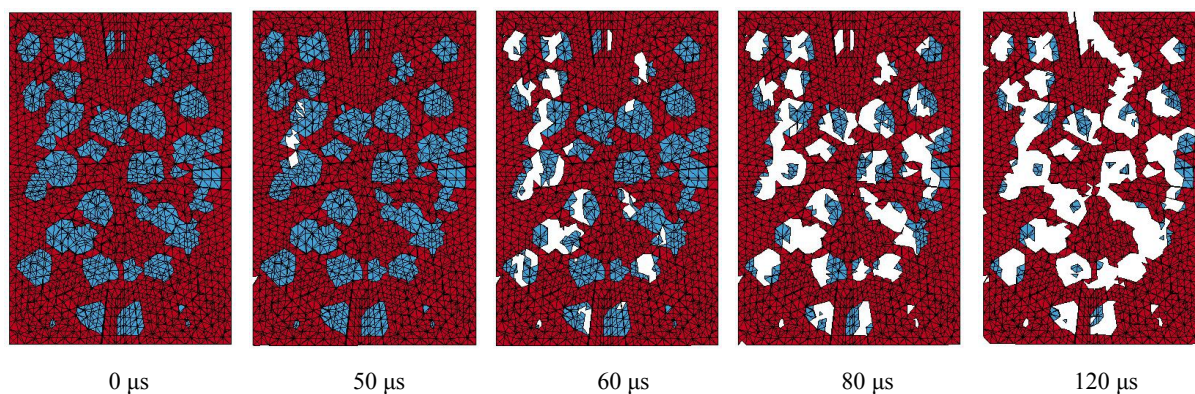


图10 动态破坏过程剖面(15%, 60 MPa)

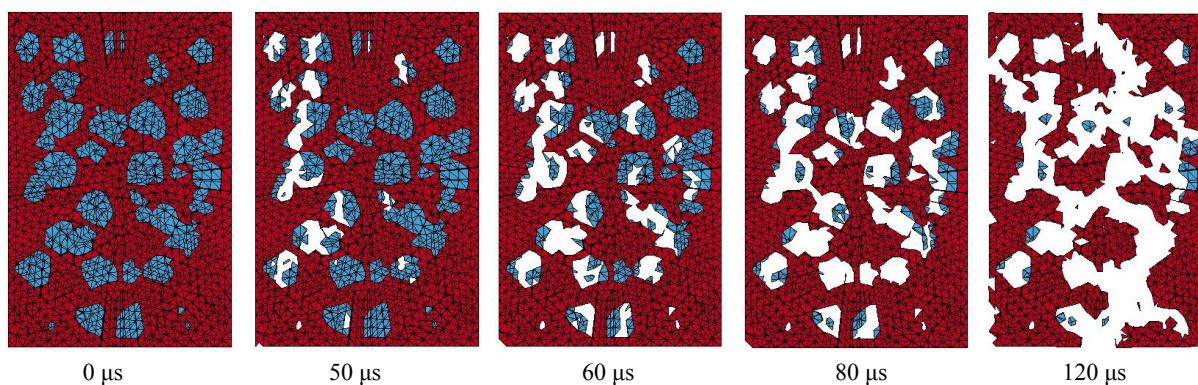


图11 动态破坏过程剖面(15%, 80 MPa)

映的损伤演化敏感度高于试验损伤,使得模拟得到的裂纹发展速度会比高速摄影仪记录得到的裂纹发展速度快。

3.3.2 模拟细观失效

图10~图13分别为15%和45%体积分数陶粒混凝土试样在60 MPa和80 MPa应力波脉冲下纵向剖

面动态损伤演化过程。可以看出试样内部的裂纹均是先从靠近打击端面的陶粒骨料产生,之后向砂浆基体扩展延伸,最终使得试样整体失效。从图10~图13可以看出,相同体积分数下随着加载脉冲的增大,陶粒混凝土的损伤速度加快;从图10和图12,图11和图13可以看到,相同加载脉冲作用下陶

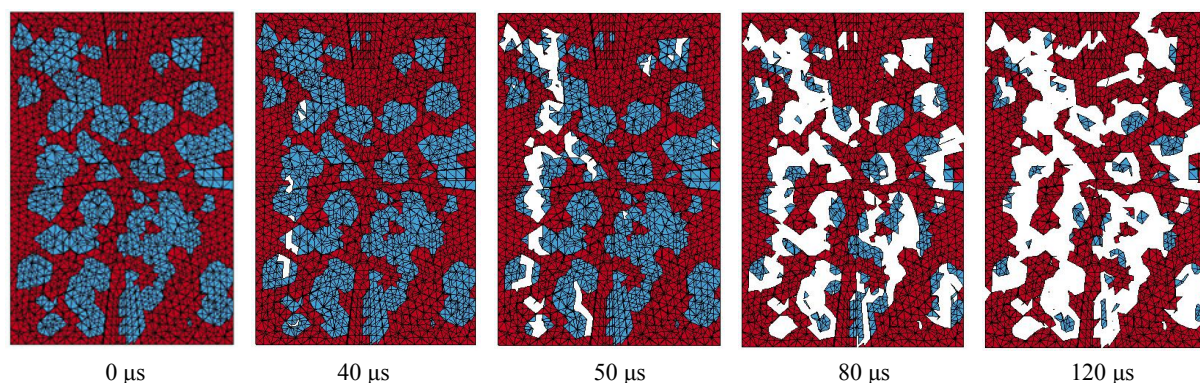


图 12 动态破坏过程剖面(45%, 60 MPa)

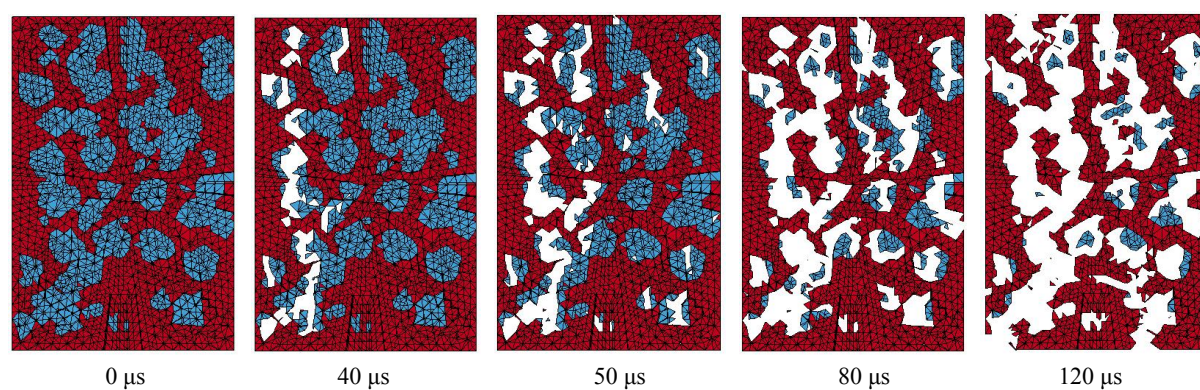


图 13 动态破坏过程剖面(45%, 80 MPa)

粒混凝土的损伤随着陶粒体积分数的增加而增加。

细观损伤过程表明,在冲击载荷作用下,陶粒混凝土的破坏是由陶粒骨料率先失效,发展为基体和试样整体的失效。

4 结论

本文使用 ANSYS/LS-DYNA 软件,运用蒙特卡洛随机数方法和背景网格建模方法,建立了陶粒混凝土的三维细观模型,分别对 60 MPa 冲击载荷下 15%和 45%体积分数的陶粒混凝土进行了数值模拟,得到以下结论:

(1)陶粒混凝土的细观破坏过程和各组分质量变化曲线均表明,陶粒混凝土的损伤破坏是从强度较弱的陶粒骨料区域开始的,之后向砂浆基体延伸扩展,最后导致试样整体失效;且陶粒体积分数越高,加载脉冲越大,损伤失效开始越早。

(2)模拟得到的应力应变曲线与试验结果吻合较好,但由于现有的模拟损伤失效是通过删除失效单元方式来实现,使得模拟与试验结果仍有差异,所以该方法还有待完善。

参考文献:

- [1] 蒋昭镛, 陈江瑛, 黄德进, 等. 混凝土结构动态安全分析的重要基础——混凝土动态力学性能[J]. 宁波大学学报(理工版), 1997, 10(2):50-57.
- [2] 裴永乐. 混凝土与砂浆动态损伤演化研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [3] WANG X, ZHANG M, JIVKOV A P. Computational technology for analysis of 3D meso-structure effects on damage and failure of concrete[J]. International Journal of Solids & Structures, 2016, 80:310-333.
- [4] BENKEMOUN N, POULLAIN P, KHAZRAJI H A, et al. Meso-scale investigation of failure in the tensile splitting test: Size effect and fracture energy analysis[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 168:242-259.
- [5] 马怀发, 陈厚群, 黎保琛. 混凝土细观力学研究进展及评述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(2): 124-130.
- [6] 陈博斐, 邱欣, 王甲, 等. 冲击压缩载荷下大尺寸混凝土力学响应的数值模拟[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(1):73-76.
- [7] 刘宗辉, 潘燕秋. 轻集料混凝土的细观损伤研究[J]. 河南城建学院学报, 2017, 26(1):7-15.
- [8] 施德胜. 陶粒体积分数对陶粒混凝土破坏行为的影响

- [D]. 宁波: 宁波大学, 2013.
- [9] 施冠银. 冻融循环对陶粒混凝土动态力学性能的影响[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
- [10] 邱欣, 陈博斐, 王甲, 等. 冻融循环对大尺寸陶粒混凝土冲击压缩性能的影响[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(S1):94-97.
- [11] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society (Section B), 1949, 62(11):676.
- [12] 方秦, 洪建, 张锦华, 等. 混凝土类材料 SHPB 实验若干问题探讨[J]. 工程力学, 2014, 31(5):1-14.
- [13] 李耀, 李和平, 巫绪涛. 混凝土 HJC 动态本构模型的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(8): 1244-1248.
- [14] 陈星明, 刘彤, 肖正学. 混凝土 HJC 模型抗侵彻参数敏感性数值模拟研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(3): 313-318.
- [15] ALBERTINI C, CADONI E, LABIBES K. Impact fracture process and mechanical properties of plain concrete by means of an Hopkinson bar bundle[J]. Le Journal De Physique IV, 1997, 7(C3):915-920.
- [16] 刘光廷, 王宗敏. 用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(1): 84-89.
- [17] 党发宁, 韩文涛, 郑娅娜, 等. 混凝土破裂过程的三维数值模型[J]. 计算力学学报, 2007, 24(6):829-833.
- [18] 王娟, 李惠霞, 邓宇. 基于细观力学的仿真研究及其应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015:80-82.
- [19] 刘翼伯, 李平江, 计亦奇. 陶粒有效弹性模量及其预估[J]. 混凝土, 2005(3):35-38.

3D simulation of damage development of ceramsite concrete under impact loading

WANG Jia, XIAO Sheng-zhe, QIU Xin, CHEN Jiang-ying*

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to study the damage development law of ceramsite concrete under impact loading, methods of the Monte Carlo random number and background mesh modeling are used to establish the 3D numerical model of ceramsite concrete. The simulation results indicate that the rate of meso-damage evolution of ceramsite concrete increases with the increase of the volume fraction of the ceramsite and the amplitude of the loaded pulse. The meso-scale numerical model has manifested the damage process of ceramsite concrete clearly. Also found is that the damage expands from the aggregate area to the mortar matrix.

Key words: ceramsite concrete; meso-damage; simulation; impact

(责任编辑 史小丽)