

文章编号: 1000-4750(2006)02-0060-06

平面爆炸波在半无限混凝土介质中 传播与衰减特性的数值分析

*董永香¹, 夏昌敬², 段祝平³

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中国矿业大学(北京)岩石力学与分形研究所, 北京 100083;

3. 中国科学院力学研究所LNM, 北京 100080)

摘 要:采用非线性软件 LS-DYNA, 混凝土选用 JHC 模型的基础上, 数值模拟了一维应变下爆炸波在半无限混凝土介质中的传播过程, 得到了平面爆炸波在混凝土中随时间和空间的衰减规律, 以及在爆炸冲击波作用下, 脆性介质混凝土形成破碎区和损伤区的演化特性。数值拟合结果表明, 在爆炸近区应力波幅值衰减速率快, 材料损伤演化和应力波幅值衰减存在着内在的联系。模拟结果对于爆破与防护工程设计均具有一定的参考价值。

关键词:平面爆炸波; 传播特性; 数值模拟; 半无限介质; 混凝土

中图分类号: O382⁺.2 文献标识码: A

NUMERICAL ANALYSIS OF PLANE EXPLOSIVE WAVE PROPAGATION WITH ITS ATTENUATION BEHAVIOR IN SEMI-INFINITE MEDIUM

*DONG Yong-xiang¹, XIA Chang-jing², DUAN Zhu-ping³

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, BIT, Beijing, 100081, China;

2. Institute of Rock Mechanics and Fractals, CUMT, Beijing 100083, China; 3. LNM, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: The propagation process of explosive wave under uniaxial strain conditions in semi-infinite concrete is simulated by LS-DYNA software. The attenuation laws of plane explosive wave with the time-space in concrete are obtained based on the Johnson-Holmquist-Cook constitute model (JHC) for concrete. The material crushing performance due to the damage evolution formed in the concrete under blast loading is also presented. The fitted curves of the simulation results indicate that the amplitudes of stress waves adjacent to blast sources decrease significantly. It shows that the damage evolution of material is related to the attenuation of the stress wave amplitude. Numerical results will provide reference for the design of blasting and protective projects.

Key words: plane explosive wave; characteristics of the explosive wave; numerical simulation; semi-infinite medium; concrete

研究爆炸波在混凝土介质中传播与衰减特性, 了解爆炸波作用下混凝土材料的动态力学性能, 有着十分重要的工程背景和现实意义。混凝土作为一种应用广泛的工程材料, 是民用建筑与防护工事的主要建筑材料。但混凝土力学性能的研究大多集中

在准静态小应变的分析范围, 当混凝土应用于防护工程和军事设施, 受到爆炸冲击的强动载荷作用时, 与准静态状态不同, 需要考虑大应变、高应变速率和高围压下及材料损伤失效的动态响应。

爆炸波在介质中的传播分析, 提供了研究与冲

收稿日期: 2004-04-01; 修改日期: 2004-07-21

作者简介: *董永香(1973), 女, 山西定襄人, 博士, 从事爆炸与冲击动力学研究(E-mail: dongyongx@bit.edu.cn);

夏昌敬(1975), 男, 江苏徐州人, 博士, 从事爆炸力学和岩土力学方面的研究(E-mail: xiajcj@ustc.edu.cn);

段祝平(1938), 男, 江苏人, 研究员, 博士生导师, 从事材料动力学研究。

击和爆炸有关的动态载荷条件下材料响应的唯一方法。特别在装甲防护等方面的进展,强烈地取决于模拟应力波传播和改进表征材料动态响应特性等方面的进展^[1]。爆炸动力学过程非常复杂,在对材料性能、几何等方面采用假设与简化的基础上,仍不可能进行精确地解析分析,得到偏微分方程组的理想封闭解。而数值模拟作为一种十分有效的工具,它可以提供整个问题的物理图象,使我们对其发生的现象有较清晰的理解。因此,现代的计算方法越来越成为解决非线性问题的必要工具^[2],力学加计算机将成为工程设计的手段^[3]。

本文立足于应用背景与学科背景,通过商业有限元软件,进行了一维应变条件下爆炸冲击波在混凝土中传播和衰减特性的数值研究。

1 计算模型建立及材料模型选用

计算模型如图1所示,坐标原点位于炸药与混凝土的接触面上。计算时采用2D轴对称模型对称轴上的单元来代替一维应变模型单元进行分析,这在

b取较大值时,是可行的。因而,在建立几何模型时根据模型的对称性,仅取图1所示的右半侧部分。

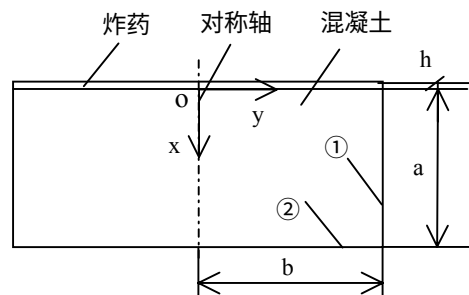


图1 模型尺寸示意图

Fig.1 Diagram of calculational model

如图1所示,上层为厚度 $h = 5 \text{ mm}$ 的TNT炸药,下面为半无限混凝土。计算区域 $a \times b = 7 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 。为减少计算模型边界效应的影响,在图1所示的①和②两个边界上增加了无反射边界条件。模型采用Lagrange算法,炸药采用多点起爆方式,起爆点设为炸药上表面的所有节点。接触爆炸通过分配参数法接触算法来实现。

表1 TNT炸药主要材料参数^[4]

Table 1 Material parameters of TNT high explosive used in simulation

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$D_H/(\text{m}/\text{s})$	P_{CJ}/GPa	A'/GPa	B'/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1.63	6930	20.60	373.8	3.75	4.15	0.9	0.35	6.0

表2 混凝土JHC模型的材料参数^[5]

Table 2 Material constants used for concrete with JHC model

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	A	B	N	C	f'_c/GPa	$S_{\max}$	D_1	D_2
2.44	0.79	1.60	0.61	0.007	0.048	7.0	0.04	1.0
E_{fmin}	$P_{\text{Crush}}/\text{GPa}$	μ_{Crush}	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	$P_{\text{lock}}/\text{GPa}$	μ_{lock}	T/GPa
0.01	0.016	0.001	85	-171	208	0.80	0.10	0.004

炸药采用JWL状态方程:

$$p = A'(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B'(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$

p , E 和 V 分别表示爆轰产物的压力、单位体积的内能和比容(即单位体积装药产生的爆轰产物的体积)。状态方程中的系数 A' 、 B' 、 R_1 、 R_2 、 ω 为描述JWL方程必须五个独立物理常数。表1列出了TNT炸药的主要参数,其中 ρ 为炸药密度, D_H 为爆速, E_0 为爆轰初始内能; P_{CJ} 为CJ爆轰压力。

JHC(Johnson-Holmquist-Cook)模型是一种表征的材料模型,它与金属材料中应用广泛的JC(Johnson-Cook)模型相类似,没有严格遵循流动法

则、一致性条件和强化规律,其特点是能够反映混凝土等脆性材料在大应变、高应变速率和高围压下及材料损伤失效的动态响应^[5]。因此,数值计算中混凝土采用JHC模型,其本构关系为:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + B P^{*N}][1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)]$$

其中 $\sigma^* = \sigma / f'_c$, $P^* = P / f'_c$, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$,

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1 (P^* + T^*)^{D_2}}, \quad T^* = T / f'_c$$

式中 σ 为等效真应力, P 为压力, f'_c 为静态单轴抗压强度, $\dot{\epsilon}$ 为等效真应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, A , B , N , C 均为由实验确定的常数, D ($0 \leq D \leq 1$) 为

损伤系数, D_1 与 D_2 为实验所得损伤常数, $\Delta \varepsilon_p$ 为等效塑性偏应变增量, $\Delta \mu_p$ 为塑性体积应变增量, T 为最大抗拉静水压力。另外, 模型还需给出最大无量纲强度 $S_{\max}$ (如图2), 损伤常数 E_{fmin} , 表示允许材料的塑性应变达到一定值时破坏(如图3)。压力与体积应变关系分段表示(如图4), 当材料被压实后, 压力表达式为

$$P = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 \quad (\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}})$$

式中 K_1 、 K_2 与 K_3 为材料常数, μ_{lock} 为体积应变极值, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ 。表2为混凝土JHC模型的材料参数。

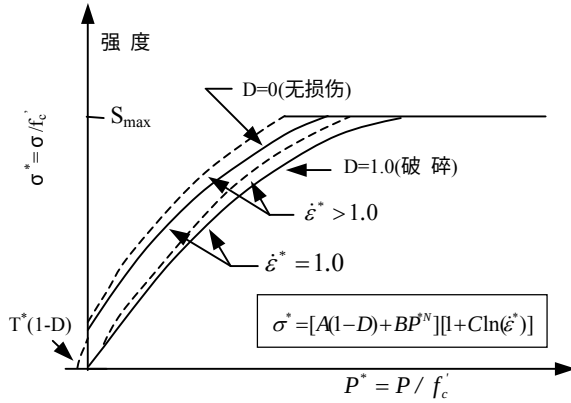


图2 JHC 本构模型

Fig.2 Description of JHC Model

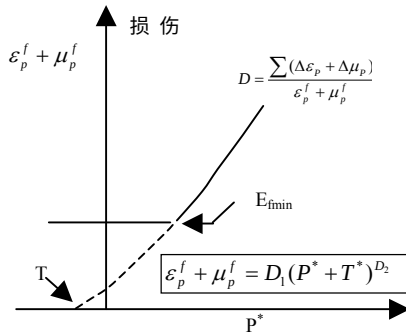


图3 损伤模型

Fig.3 Description of damage

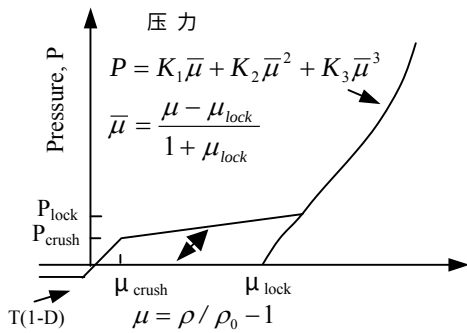


图4 JHC 压力-体积变形关系

Fig.4 Relationship of pressure and volumetric strain

2 仿真结果与分析

图5与图6分别显示了爆炸波在不同传播位置处 σ_x 随时间的演化波形。由于 σ_x 在初始位置的应力峰值与衰减为弹性波后的应力峰值相差三个数量级, 为了更清楚描述应力波形的演化, 下面采用分段表示。

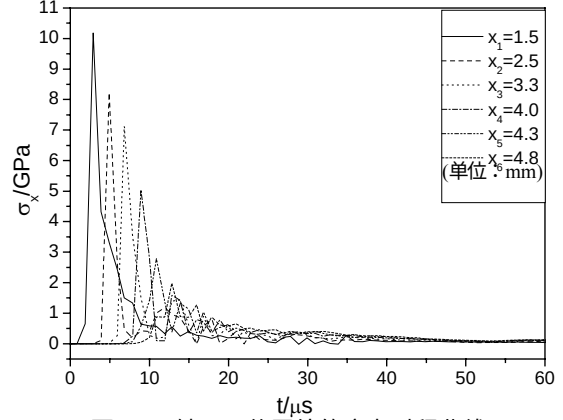


图5 x 轴不同位置处的应力时程曲线

Fig.5 Stress σ_x versus time t at different positions

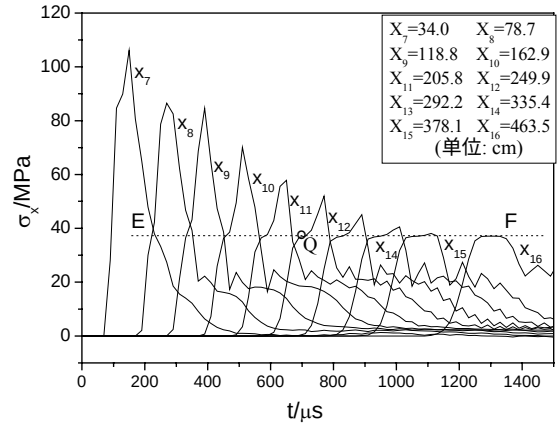


图6 x 轴不同的位置处的应力时程曲线

Fig.6 Stress σ_x versus time t at different positions

由图5($t \leq 60 \mu s$)的曲线可以看出, 爆炸初期传入混凝土的波形是陡峭的冲击波, 其上升沿时间短, 脉宽窄, 但应力幅值下降迅速, 这可以从后面应力波峰值衰减的拟合公式中看出。与图5相比, 图6($t \leq 1500 \mu s$)中显示的应力波形具有明显的不同。随着爆炸波的传播, 应力波峰值随时间和空间逐渐衰减, 爆炸波上升的前沿变得较为缓慢。

以 x_{12} 处的波形为例进行分析。Q点对应的 σ_x 为混凝土的动态抗压强度 $\sigma_c = Af'_c$, 其中 A 与 f'_c 分别对应于JHC模型中的材料常数与静态单轴抗压强度。本文所采用混凝土的 σ_c 约为38MPa。Q点前为弹性前驱波(材料弹性波速一般大于塑性波速), Q

点之后到 σ_x 的应力峰值出现之前为塑性波区,在达到应力峰值后由于尾随卸载波的作用开始卸载。参考一维应变理想弹塑性材料应力应变关系,卸载开始后首先为弹性卸载,随着 σ_x 的降低,在卸载到零之前,满足反向屈服条件:

$$\sigma_x - \sigma_y = -Y \quad (Y \text{ 为屈服强度})$$

开始反向塑性变形,传播反向塑性加载波^[6,7]。对于岩土材料,压碎后不存在反向屈服问题。图6中应力波峰随着时间的增加,衰减趋势较图5已相对平缓。随空间位置的不同,由 x_7 到 x_{16} 每个应力波形的峰值在后面卸载波和介质的波阻抗的作用下逐渐削减,在 x_{15} 的位置已彻底变成了“馒头”形的弹性波^[8]。

由此可见,从0时刻引爆炸药开始,爆炸波随着时间和 x 值的增大而逐渐减小。从 $t = 4\mu\text{s}$ 应力幅值为GPa的量级,到 $t = 1200\mu\text{s}$ 时, x 值约为4~5m的位置,应力幅值已接近混凝土的动态抗压强度 σ_c ,爆炸冲击波随时空变化逐渐演化为弹性波。

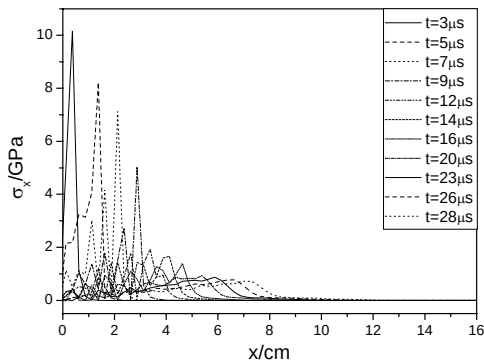


图7 x 轴应力在不同时刻的空间演化曲线

Fig.7 Stress σ_x versus position x at different time

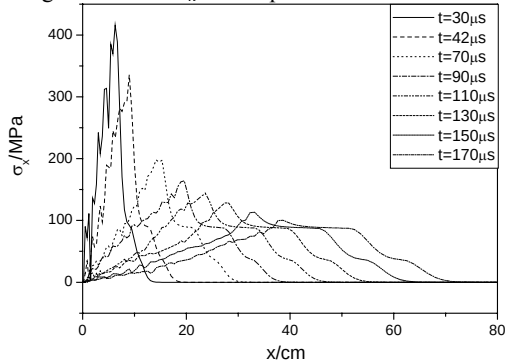


图8 x 轴应力在不同时刻的空间演化曲线

Fig.8 Stress σ_x versus position x at different time

图7~图9 分区给出了 σ_x 在不同时刻的空间演化曲线。与图5和图6相类似,不同的是后者给出的是 σ_x 在不同位置处的时间演化。应力峰值在较小的 x 值与 t 值时衰减快,随着爆炸波的演化,峰值

的下降逐渐平缓,最后趋于一个定值。由图7可以看出,当 t 取较小值, σ_x 在应力峰值后波形呈锯齿形跳跃,这可能与该位置的损伤破碎相关^[8],材料破坏失效,该处的应力值下降。从下文对损伤 D 的演化可以进一步证明。

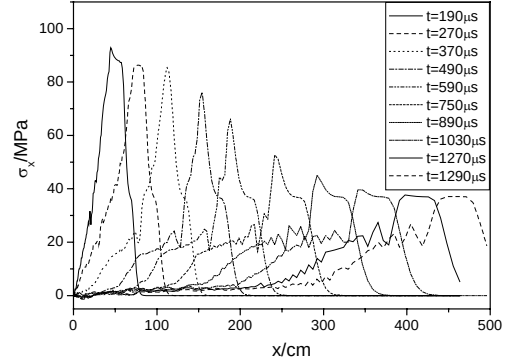


图9 x 轴应力在不同时刻的空间演化曲线

Fig.9 Stress σ_x versus position x at different time

从图6与图9的波形看,二者存在镜像对应关系。图6中横坐标 t 从小到大的波形与图9横坐标 x 从大到小的波形相对应。图9的各波形中前面的部分为弹性加载波,当 σ_x 大于屈服值时形成塑性冲击波,与上面对 σ_x 在时间域的分析相似。为了进一步分析 σ_x 随时间和空间的衰减规律,我们分别对相应的曲线进行数据拟合。分别采用 σ_c, h, τ 对应力 σ_x 峰值, x 值和时间 t 进行无量纲化,其中 h 为炸药厚度, τ 为冲击波特征时间(取爆压峰值的 $1/e$ 所对应脉宽)。根据 σ_x 随时间和空间的传播曲线,对不同时刻与不同 x 值的应力峰值 $\sigma_{\max}$ 衰减分别进行拟合^[9],拟合曲线见图10和图11,拟合公式为:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} = 354.3 \times e^{-0.21 \times (\frac{x}{h})} \quad (0 < x/h \leq 920) \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} = 416.0 \times e^{-0.3 \times (\frac{t}{\tau})} + 12.3 \times e^{-0.01 \times (\frac{t}{\tau})} \quad (0 < t/\tau \leq 700) \quad (2)$$

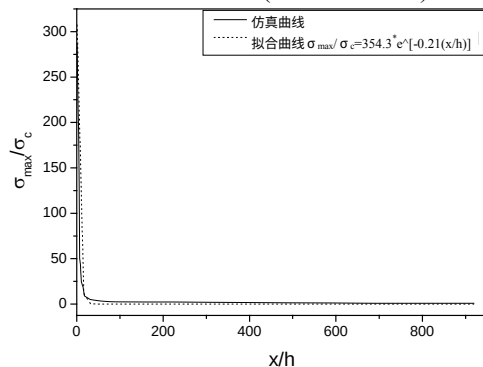


图10 x 轴(0~920)的应力峰值衰减和拟合曲线

Fig.10 Computed peak stress and fit curves ($0 < x/h \leq 920$)

上述各方程控制衰减的主要系数分别为 0.21 和 0.30, 时间域与空间域的应力幅值衰减相比, 时间域的衰减要更快一些。从图中还可以看出, 在时间和空间内, 前阶段应力幅值的衰减速度均远远大于后阶段的衰减速度。

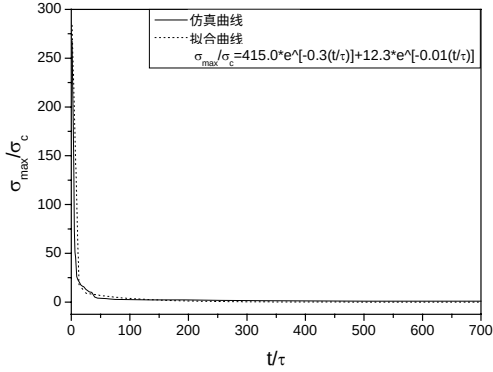


图 11 x 轴应力峰值随时间(0~700)的衰减和拟合曲线

Fig.11 Computed peak stress and fit curves (0<t/τ≤700)

图 12 和图 13 为损伤随时间和空间的演化曲线, 分别表示在不同位置随时间的损伤累积和在不同时刻随空间的损伤减小过程。计算结果表明, 损伤区域与总的计算区域相比较小, 损伤累积为 1 时的破碎区仅集中在邻近炸药一端的混凝土的有限区域。从图中可知, 损伤在时间域与空间域内衰减速度较快, x/h 为 100 的位置当 $t=150\mu s$ 时, 损伤已是一个小量, 可以近似忽略。

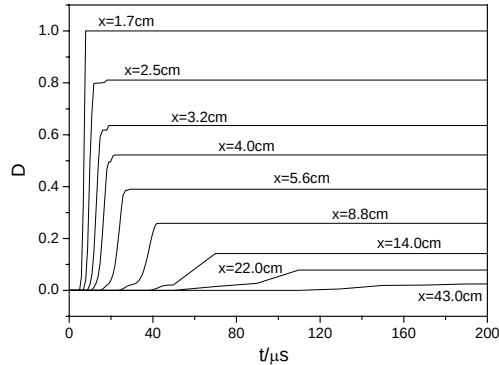


图 12 不同位置处损伤因子 D 随时间的演化

Fig.12 Damage evolution at different positions

由图 12 可知, 在 x 轴的任一位置损伤在爆炸波传播后将保持一个定值, 而损伤从初始的 0 值上升到一个定值所需时间与 x 轴所处位置密切相关, 与该位置的应力状态和波形相联系, 在压力较高的区域, 损伤 D 累积到定值的时间短, 而在压力较低的区域, 离爆源较远处, 损伤量趋于达到定值的时间较长。

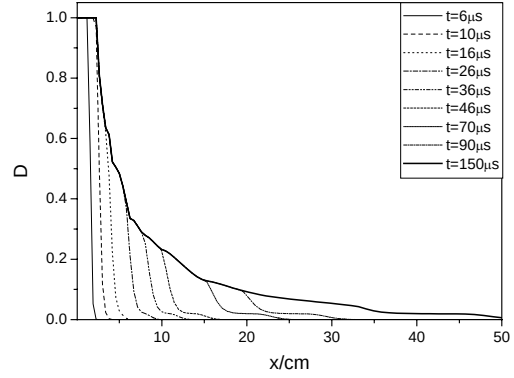


图 13 不同时刻损伤因子 D 随空间 x 轴的演化

Fig.13 Damage evolution at different time

图 13 表明了不同时刻损伤随 x 值的指数衰减过程, 根据损伤在 x 轴的分布, 可以将材料划分为几个不同的变形区域 (如图 14)。分别用 c 表示损伤 D 等于 1 的破碎区, 用 p 表示当 $0 < D < 1$ 时的塑性区, 用 e 来表示当 D 近似为零时的弹性变形区。

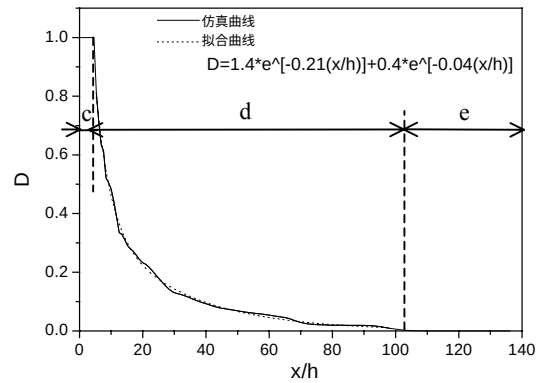


图 14 损伤 D 随空间 x 轴的分布及拟合曲线

Fig.14 Damage distribution in a semi-infinite concrete

图 14 显示了损伤量 D 与无量纲 x/h 在整个计算域内拟合曲线及相应的拟合公式:

$$D = 1.4 \times e^{-0.21 \times (\frac{x}{h})} + 0.4 \times e^{-0.04 \times (\frac{x}{h})} \quad (0 < \frac{x}{h} \leq 140) \quad (3)$$

损伤量 D 随空间的衰减系数约为 0.21, 与无量纲应力 σ_{max}/σ_c 随空间的(1)式的衰减系数相同, 说明在爆炸近区二者衰减规律相近, 由此可以通过应力幅值的衰减系数来近似推断损伤的演化规律。这也进一步反映出爆炸波衰减与材料动态损伤演化之间的关联性, 同时与文献[10]得出的声波衰减系数与损伤能量具有一定对应关系的结论是相一致的。

为了更加直观地观察应力波 σ_x 随时间空间的传播与衰减, 图 15 给出了 $0.1ms \leq t \leq 1.5ms$, $0 \leq x \leq 500cm$ 时应力波 σ_x 随时间与空间的三维传播图。从图中可以清晰地看到爆炸波在传播过程中

应力传播与衰减的时空波形。图 16 为损伤 D 随时空的演化, 由图 16 更直观地看到 D 随时间的累积过程和随空间的衰减过程。

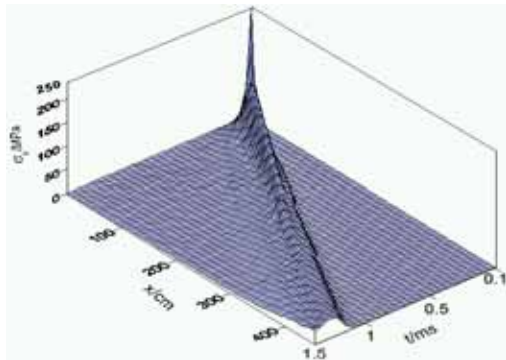


图 15 应力 σ_x 三维时空演化图

Fig.15 Three-dimensional display of stress σ_x

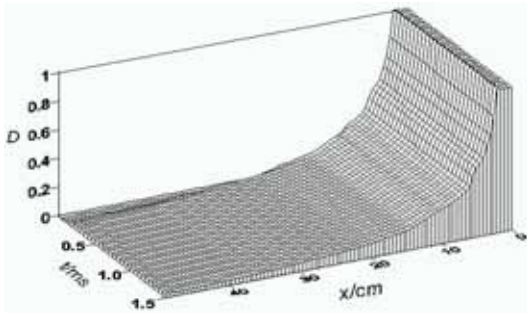


图 16 损伤 D 的三维时空演化图

Fig.16 Three-dimensional display of damage

3 结论

通过对一维应变下爆炸波在半无限混凝土介质传播的数值分析, 获得了以下几点结论:

(1) 通过数值模拟获得了平面爆炸波在混凝土介质中的演化波形, 由爆炸近区的强间断三角波逐渐演化成了弹塑性冲击波, 最后衰减为“馒头”形的弹性波;

(2) 计算得到了爆炸波峰值在半无限混凝土中随时空的衰减系数, 在爆炸近区衰减速率更快;

(3) 获得了混凝土在爆炸载荷作用下形成破碎和损伤区域的演化特性, 及其形成的三个区域: 破碎区、损伤区和弹性区;

(4) 数值结果的拟合公式表明, 爆炸近区应力波和材料损伤的衰减系数近似相等, 揭示了二者演化规律之间的相关性。

参考文献

- [1] Rice JR (Editor). Research trends in Solid mechanics. Appl. Mech. Rev [J]. 1985, 38: 1276~1278.
- [2] Chandrakan S Desai. Mechanics of Material and Interfaces the disturbed state concept [M]. New York: CRC Press, 2000.
- [3] 王礼立. 爆炸力学数值模拟中本构建模问题的讨论[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(2): 97~104.
Wang Lili. On constitutive modeling in numerical simulation of explosion mechanics [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(2): 97~104. (in Chinese)
- [4] Ma G W, Hao H, Zhou Y X. Modeling of wave propagation induced by underground explosion [J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(3/4): 283~303.
- [5] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A Computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures [C]. 14th International Symposium on Ballistics, 1995, 591~600.
- [6] 王礼立, 胡时胜, 王肖钧. 在弹塑性介质中传播的平面激波的衰减[J]. 中国科学技术大学, 1983, 13 (1): 91~99.
Wang Lili, Hu Shisheng, Wang Xiaojun, The attenuation of plane shock waves propagating in elastic-plastic medium [J]. Journal of China University of Science and Technology, 1983, 13(1): 91~99. (in Chinese)
- [7] Zukas, J. A., T. Nicholas, H. F. Swift, L. B. Greszczuk, and D. R. Curran. Impact dynamics [M]. Wiley, New York, 1982.
- [8] 褚桂敏整理, 胡明志校对. 固体中的应力波导论[M]. 强度与环境编辑部, (H.Kolsky 1983 年来华讲学讲稿整理): 39~41.
Chu Guimin, Hu Mingzhi. Stress wave in solids [M]. Intensity and environment newsroom (The collated lectures given by H.Kolsky on visiting China in 1983): 1983. 39~41. (in Chinese)
- [9] 席道瑛, 郑永来. PVDF 压电计在动态应力测量中的应用[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2): 174~179.
Xi Daoying, Zheng Yonglai. Application of PVDF gauges to dynamical stress measurements [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(2): 174~179. (in Chinese)
- [10] 高文学, 刘运通, 杨军. 脆性岩石冲击损伤模型研究[J]. 岩石力学和工程学报, 2000, 19(2): 153~186.
Gao Wenxue, Liu Yuntong, Yang Jun. A study of shock damage model of brittle rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 153~186. (in Chinese)