文章编号:1000-5773(2007)04-0354-05

弹丸在混凝土靶中运动轨迹的数值模拟*

田占东[1],李守苍[2],段卓平[3],张震宇[1]

(1. 国防科技大学理学院技术物理研究所,湖南长沙 410073;
2. 山东机器(集团)有限公司,山东淄博 255201;
3. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要:针对混凝土的破坏模式,将最初用于研究岩石破碎的连续损伤模型加入到三维非线性有限元动力分析程序 LS-DYNA 中。利用数值模拟方法研究了弹丸对混凝土的斜侵彻过程,对弹丸在混凝土靶中的几种可能运动轨迹进行了分析,得到了影响弹丸轨迹的几个因素。

关键词:混凝土;连续损伤模型;数值模拟
中图分类号:O385 **文献标识码**:A

1 引 言

高速运动的弹体对混凝土的侵彻、贯穿效应,对于反机场跑道和地下深层工事的常规装药战斗部研究具有重要的现实意义。混凝土靶在弹丸高速撞击下的断裂行为有两种:在拉伸波作用下的脆性断裂和压缩加载下的挤压破碎。只有正确描述混凝土材料带损伤的本构关系,才能正确分析斜侵彻条件下弹丸在混凝土靶中的运动轨迹。

本工作利用连续损伤模型[1-2]对弹丸以不同初始状态斜侵彻混凝土靶的运动轨迹进行了数值模拟分析。在利用 LS-DYNA 程序计算弹丸侵彻混凝土靶时,混凝土材料在拉伸和压缩加载下的断裂和破碎分别由损伤状态变量和有效塑性应变的失效范围来判别。

2 混凝土材料的连续损伤模型

在体积拉伸加载条件下的混凝土材料的损伤模型方程,由 Budiansky 等[3]从各向同性弹性材料里所存在的随机分布的微裂纹中推导出来的,主要由裂缝密度、损伤演化规律以及有效模量表达的应力-应变关系三部分组成

$$\frac{\bar{K}}{K}=1-\frac{16}{9}\left(\frac{1-\bar{\nu}^2}{1-2\bar{\nu}}\right)C_{\mathrm{d}} \tag{1}$$

$$\frac{\bar{G}}{G}=1-\frac{32}{45}\frac{(1-\bar{\nu})(5-\bar{\nu})}{(2-\bar{\nu})}C_{\mathrm{d}} \tag{2}$$

$$\frac{\bar{E}}{E}=1-\frac{16}{45}\frac{(1-\bar{\nu}^2)(10-3\bar{\nu})}{(2-\bar{\nu})}C_{\mathrm{d}} \tag{3}$$

式中:K、G、E 和 ν 分别是材料体积模量、剪切模量、杨氏模量和泊松比。顶上带横线的量表示材料强度下降后相应的参量值。C_{d} 是裂缝密度参数,它与初始和损伤后的泊松比相关

$$\bar{\nu}=\nu\exp\left(-\frac{16}{9}\beta C_{\mathrm{d}}\right) \qquad 0\leqslant\beta\leqslant 1 \tag{4}$$

损伤状态变量定义如下

$$D=\frac{16}{9}\left(\frac{1-\bar{\nu}^2}{1-2\bar{\nu}}\right)C_{\mathrm{d}} \tag{5}$$

* **收稿日期**:2006-11-21;**修回日期**:2007-04-24
作者简介:田占东(1978—),男,讲师,主要从事爆炸过程的数值模拟研究. E-mail:sweettzd@163.com

因而,$\overline{K}=K(1-D)$。裂缝密度参数与 N 和 a^3 的乘积成正比,N 是每单位体积中裂缝数目,a 是某一典型体积内的平均裂缝尺度

$$C_d = Na^3 \tag{6}$$

根据 Grady 等[4]的研究,N 是体积应变 $\varepsilon_V=(\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z)/3$ 的函数,可用 Weibull 分布描述,定义如下

$$N = k(\varepsilon_V)^m \tag{7}$$

式中:k 和 m 是材料常数,由与拉伸破坏应力有关的应变率确定。根据高应变率条件下破碎能量守则,Grady[5]给出脆性材料动态破碎平均裂缝尺度 a 的公式,即

$$2a = \left(\sqrt{20}K_{IC}/\rho C\dot{\varepsilon}_{V,\max}\right)^{2/3} \tag{8}$$

式中:K_{IC}、ρ 和 C 分别表示材料的断裂韧性、密度和单轴弹性波速 $(E/\rho)^{1/2}$,$\dot{\varepsilon}_{V,\max}$ 是相关体积单元所经历的最大体积应变率。

当材料中发生体积拉伸时,在每一计算时间步长内,利用方程(6)～方程(8)可以计算出裂缝密度参数 C_d,再利用方程(5)可得到损伤状态变量 D。材料的硬度按照方程(1)～方程(4)下降。在压缩状态下,材料按弹/理想塑性固体材料行为计算。

方程(1)到方程(5)也可化成应变率相关形式来求解应力和应变率。

通常的线性弹性应力和应变的关系按照体积部分和偏量部分的形式如下

$$p = 3K\varepsilon_V \tag{9}$$

$$S_{ij} = 2Ge_{ij} \tag{10}$$

式中:e_{ij} 是应变偏量张量,S_{ij} 是应力偏量张量,p 是静水压力。

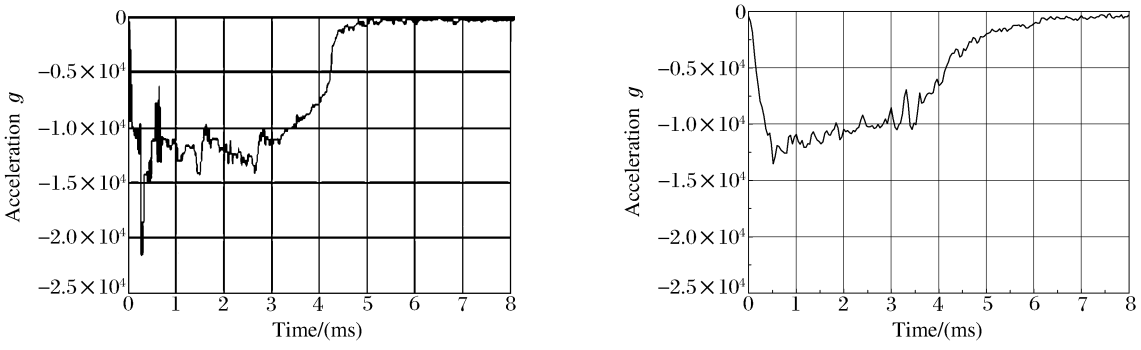
利用(5)式给出的损伤状态变量的定义,(9)式和(10)式给出的应力和应变的关系可以写成用有效模量与损伤状态变量表达的形式

$$p = 3K(1-D)\varepsilon_V \tag{11}$$

$$S_{ij} = 2G(1-D)e_{ij} \tag{12}$$

这里为了简化,剪切模量随着体积模量一同下降。

图 1 给出的是⌀100 mm 弹丸以 495 m/s 的速度侵彻素混凝土过程中,弹丸负加速度实测曲线和计算曲线的比较。实验中弹丸侵彻深度为 112.0 cm,计算结果为 113.5 cm。从加速度曲线和侵彻深度的比较可以看出,计算结果与实验结果符合得较好。混凝土材料的连续损伤模型参数见表 1[5]。



(a) Experimental results　　(b) Calculated results

图 1　实验结果和计算结果的比较

Fig. 1　Comparison of experimental and calculated results

表 1　混凝土材料参数

Table 1　Parameters for concrete

E/(GPa)	ν	ρ/(g/cm^3)	σ/(MPa)	K_{IC}/(MPa·m$^{1/2}$)	m	k/(m^{-3})
20.68	0.18	2.52	140	2.747	6.0	5.753×10^{21}

3 弹丸对混凝土靶斜侵彻过程的数值计算

3.1 弹丸以 860 m/s 速度、30°倾角对混凝土靶的斜侵彻

建模时，考虑了对称性，只建立二分之一模型，在对称面上设置对称边界条件。同时只在弹丸侵彻混凝土靶时可能走过的范围内取较细的网格，其余部分取粗网格，方形六面体细网格的边长 0.6 cm，粗网格的边长 1.8 cm，细网格到粗网格自然过渡。模型中混凝土靶尺寸为 150 cm×60 cm×20 cm，除对称面外，上、下表面为自由面，其余两个侧面和背面均为无反射压力界面，以模拟侧面和背面的无限尺寸，这样可以在不影响侵彻计算精度的条件下减小混凝土靶的几何尺寸。弹丸直径 125 mm，长度 640 mm，弹丸质量 28 kg。该算例几何模型的总网格数约 60 万。

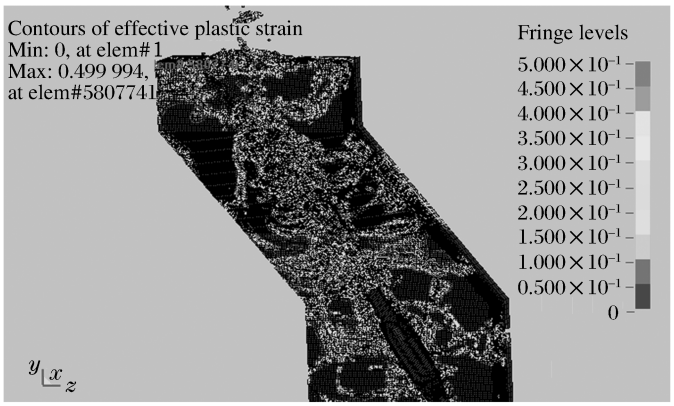


图 2 $t=3\,000\ \mu s$ 时刻混凝土靶的网格变形及损伤变量等值线

Fig. 2 Damage of concrete at 3 000 μs

图 2 为弹丸以 30°倾角、860 m/s 的速度斜侵彻混凝土靶时，3 000 μs 时刻的混凝土靶的网格变形及损伤变量等值线。由图 2 清晰可见混凝土靶中的损伤裂纹发展情况，在给定的 30°倾角和 860 m/s 撞击速度条件下，弹体在混凝土靶中没有发生轨迹的偏转。

3.2 弹丸以 720 m/s 速度、40°倾角对混凝土靶的斜侵彻

图 3 为弹丸以 720 m/s 的速度对混凝土靶斜侵彻的计算模型轮廓和混凝土靶的尺寸，其中弹丸对混凝土靶的入射角为 40°。模型中混凝土的方形细网格边长约 0.6 cm，总网格数是 45 万。混凝土靶取二分之一模型，对称面上设置对称边界条件，上表面和下表面设为自由面，两个侧面和背面设为无反射压力界面。图 4 给出的是弹体进入混凝土靶前表面初期的网格变形及损伤变量等值线图。

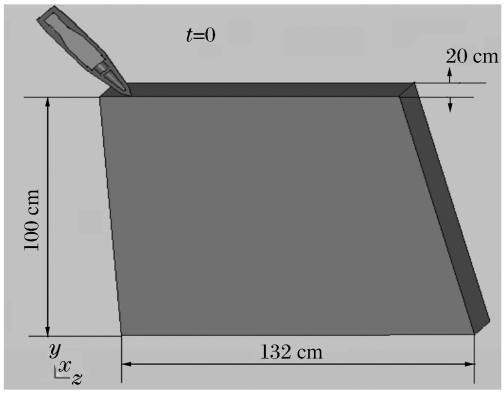


图 3 计算模型轮廓和混凝土靶的尺寸

Fig. 3 Computational model and size of concrete

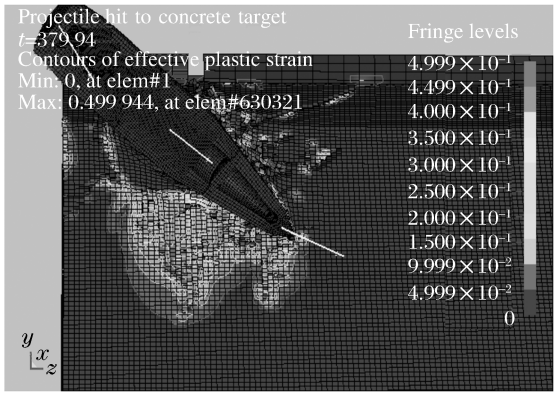


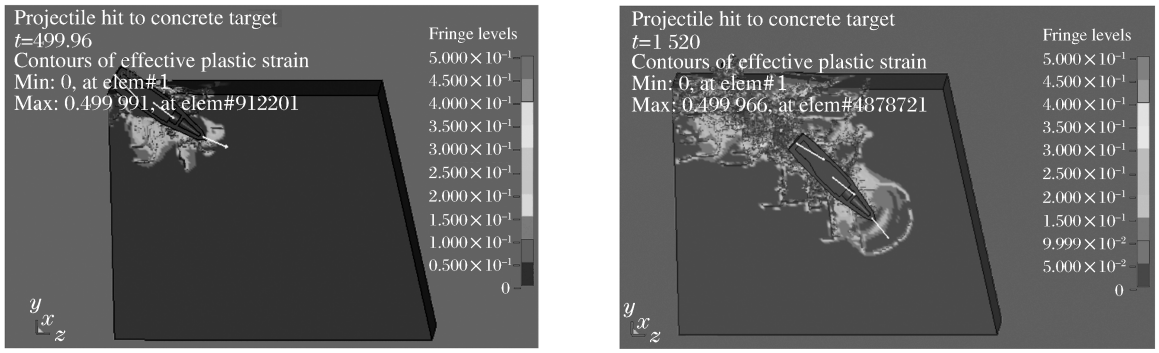
图 4 初期网格变形及损伤变量等值线

Fig. 4 Damage of concrete at early time

图 5 给出的是在弹丸斜侵彻混凝土靶的过程中，两个不同时刻的混凝土靶的损伤变量等值线和弹体上三点处的速度矢量。由图 5 所示，弹丸以 720 m/s 的速度、40°倾角对素混凝土靶斜侵彻时，弹体在混凝土靶内的运动方向会发生两次偏转。第一次偏转发生在弹体对混凝土靶斜侵彻的初期，第二次偏转发生在弹体进入混凝土靶 1 ms 后。

弹体发生两次偏转的原因可根据图 4 和图 5 进行解释，在弹体进入混凝土靶前表面初期，由于靠近头部的自由面附近出现了裂纹，从而导致该方向上的抵抗力减弱，使得弹体头部运动方向朝抵抗力较弱

的横向转变。同时,弹头左侧的混凝土也有大块损伤区,根据连续损伤模型,损伤区有大量微裂纹存在,混凝土的强度下降,这有利于弹整体对混凝土的横向压缩。如果弹的速度较低,在弹头的前方会出现平行于自由表面的横向裂纹,此横向裂纹是由自由表面反射的拉伸波所致,而弹将沿此横向裂纹运动。因为裂纹的出现是由于累积损伤所致,而损伤的积累需要一定的时间,若弹的速度较高,由自由表面反射的拉伸波所导致的横向裂纹将出现在弹头的后方。这使得当弹进入混凝土靶一定深度后,弹头的横向偏转将停止,而自由表面附近的裂纹又会有利于弹体尾部向该强度较弱的方向回摆,从而导致弹体运动方向的第二次偏转。



(a) $t=500\ \mu s$　　(b) $t=1\,520\ \mu s$

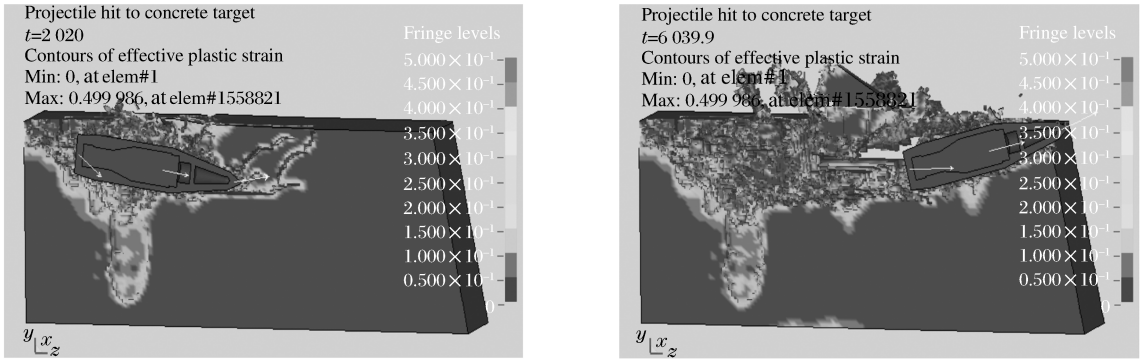
图 5　混凝土靶的损伤变量等值线和弹体上三点处的速度矢量

Fig. 5　Damage of concrete and the velocity vector of three nodes at different times

3.3　弹丸以 300 m/s 速度、40°倾角对混凝土靶的斜侵彻

图 6 给出的是弹丸以 300 m/s 的速度对混凝土靶斜侵彻结果,图中显示的是两个不同时刻的损伤变量等值线和弹丸上三点处的速度矢量图。弹丸对混凝土靶的入射角为 40°。

很明显,当模型中的弹丸以 300 m/s 的速度、40°倾角对素混凝土靶斜侵彻时,会发生跳弹。发生跳弹的原因与弹的入射速度和入射角度有关。由图 6 所示的弹在入靶初期的网格变形图和弹头部速度矢量表明,由于靠近头部的自由面附近出现了裂纹,从而导致该方向上的抵抗力减弱,弹丸在入靶后 230 μs左右其头部运动方向即开始发生转变。这时弹丸头部的垂直入靶深度约 4.5 cm。



(a) $t=2\,020\ \mu s$　　(b) $t=6\,040\ \mu s$

图 6　两个不同时刻的损伤变量等值线和弹丸上三点处的速度矢量

Fig. 6　Damage of concrete and the velocity vector of three nodes at different times

3.4　弹丸以 300 m/s 速度、40°倾角对混凝土靶的斜侵彻

如果弹丸的入射角度较小,弹速很低时,弹丸只会在混凝土靶的表面造成一个弹坑,然后弹出。图 7给出的是弹丸以 30°倾角、200 m/s 的速度对混凝土靶斜侵彻时,2 000 μs 时刻弹丸上两点处的速度

矢量及混凝土靶的网格变形图。这时弹丸部的横向摆动会在混凝土靶的表面附近造成较大的弹坑，当弹丸对混凝土的作用压力小于混凝土的强度时，弹丸很容易从混凝土靶的表面弹坑中回弹出。

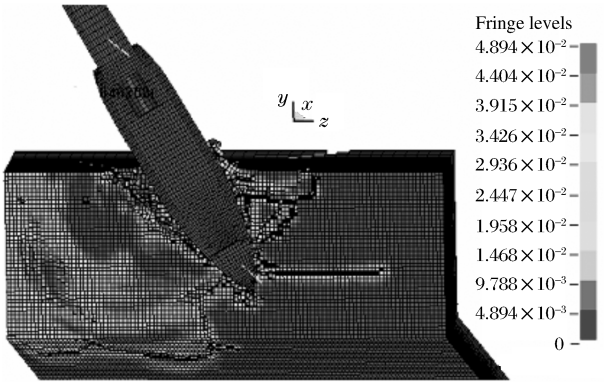


图 7 弹丸上两点处的速度矢量及混凝土靶的网格变形图

Fig. 7 Damage of concrete and the velocity vector of two nodes

4 讨 论

从计算结果中可以看出，连续损伤模型能很好地描述混凝土靶由拉伸效应引起的断裂，可以模拟弹丸斜侵彻混凝土靶时，弹道轨迹发生偏转的现象。

弹丸斜侵彻混凝土靶时，由于混凝土材料的非均匀性，自由表面发射的拉伸波在靶内产生横向裂缝，导致弹丸的运动轨迹发生偏转。随着弹丸速度、倾角的不同，弹丸的轨迹会出现跳弹、两次偏转、近似直线等多种运动轨迹。

References:

[1] Chen E P. Simulation of Concrete Perforation Based on a Continuum Damage Model [R]. DE-95000544, 1994.

[2] Zhang Z Y. Continuum Damage Model of Concrete Penetrated by Projectiles [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(Suppl): 67-68. (in Chinese)
张震宇. 弹丸对混凝土靶侵彻贯穿的连续损伤模型 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(增刊): 67-68.

[3] Budiansky B, O'Connell R J. Elastic Moduli of a Cracked Solid [J]. Int J Solids Struct, 1976, 12: 81-97.

[4] Grady D E, Kipp M E. Continuum Modeling of Explosive Fracture in Oil Shale [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1980, 17: 147-157.

[5] Grady D E. The Mechanics of Fracture under High-Rate Stress Loading [A]//Preprints of the William Prager Symposium on Mechanics of Geomaterials: Rocks, Concrete and Soils [C]. Evanston, Illinois: Northwestern University, 1980: 149-188.

Numerical Simulation of the Trace of Projectiles Penetrating Concrete

TIAN Zhan-Dong[1], LI Shou-Cang[2], DUAN Zhuo-Ping[3], ZHANG Zhen-Yu[1]

(1. *Institute of Technical Physics, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*;
2. *Shan Dong Machine Ltd. (Group), Zibo* 255201, *China*;
3. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The continuum damage model which was originally developed to study rock fragmentation was implemented into the transient dynamic explicit finite element code LS-DYNA3D, and then the code is used for the numerical simulation of projectiles' penetrating the concrete. The possible traces of the projectiles in the target are investigated and the factors dominating the trace are found.

Key words: concrete; continuum damage model; numerical simulation