第 24 卷 第 1 期
2010 年 2 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 24, No. 1
Feb., 2010

文章编号：1000-5773(2010)01-0021-05

颗粒体侵彻数值计算方法研究*

刘小虎，祝 涛

（华中科技大学力学系，湖北武汉 430074）

摘要：分别采用连续体有限元方法、离散元方法、离散颗粒有限元方法和有限元-离散元混合方法，对钢球以 100 m/s 和 200 m/s 的速度侵彻细沙石回收靶过程进行了数值计算，通过对 4 种方法的计算精度和计算效率的比较分析，表明有限元-离散元方法更适合于颗粒材料侵彻问题的数值计算。

关键词：侵彻；颗粒材料；软回收；离散元；有限元

中图分类号：O385 **文献标识码**：A

1 引 言

弹丸侵彻靶板是弹药工程的一项重要研究内容，人们已经针对各种金属、混凝土、岩石等硬目标以及泥土等软目标开展了大量的实验和数值研究[1-3]。为了了解侵彻过程中弹丸内部机电系统的动态响应和功能实现情况，通常在弹丸内部安装电子芯片进行侵彻实验，对侵彻后的弹丸进行软回收，读取弹内记录的信息。所谓软回收就是要求在合理的侵彻距离以内使弹丸停留在回收箱中，并且力求回收过程对弹丸产生的影响最小。软回收靶箱可以用水、土、沙、塑料颗粒以及泡沫等柔软材料填充，工程中经常使用细沙和塑料颗粒作为回收箱的填充材料。为了确定弹丸以剩余速度在回收箱中的侵彻距离，分析软回收过程对于弹丸的影响，优化软回收箱填充材料的颗粒尺寸，需要对弹丸侵彻软回收箱颗粒材料的问题进行数值计算。

目前用于颗粒材料侵彻计算的数值方法主要有 4 种：(1) 把颗粒靶体视为连续体的有限元方法(Purely Continuum Based FEM，C-FEM)[4]；(2) 把颗粒靶体视为离散体的离散元方法(Discrete Element Method，DEM)[5-6]；(3) 把颗粒靶体视为离散体的有限元方法(Discrete Particle Based FEM，D-FEM)；(4) 有限元-离散元混合方法(FEM-DEM)[7-8]。其中第 1 种方法(C-FEM)使用较多，但是材料模型及参数不易确定；第 2 种方法(DEM)近年来发展很快，把一个颗粒作为一个离散单元，特别适合于颗粒型材料，但是无法考虑颗粒破坏；第 3 种方法(D-FEM)对实际问题的简化最少，把每个颗粒离散成若干单元形成有限元系统，但是计算规模很大；第 4 种方法(FEM-DEM)把有限元和离散元结合起来，取各自的优势。本工作以钢球以 100 m/s 和 200 m/s 的速度垂直侵彻球形沙石颗粒回收靶为例，对 4 种方法模拟离散体侵彻问题的计算精度和计算效率进行分析讨论。

2 基本理论

2.1 连续介质有限元方法(C-FEM)

动态有限元方法的控制方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}(t)=\boldsymbol{F}^{\mathrm{e}}(t)+\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}}(\boldsymbol{u},t)-\boldsymbol{F}^{\mathrm{i}}(\boldsymbol{u},t) \tag{1}$$

* **收稿日期**：2009-04-27；**修回日期**：2009-07-26
基金项目：国家自然科学基金(10672066)
作者简介：刘小虎(1968—)，男，博士，教授，主要从事计算力学研究. E-mail：xhliu@hust.edu.cn

式中：$\boldsymbol{M}$ 是集中质量阵，$\boldsymbol{F}^{\mathrm{i}}(\boldsymbol{u},t)$ 是节点内力，$\boldsymbol{F}^{\mathrm{e}}(t)$ 是外载荷，$\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}}(\boldsymbol{u},t)$ 是接触力。

2.2 离散元方法(DEM)

对于球形颗粒 i，线平动和转动运动方程为

$$m_i\ddot{\boldsymbol{u}}_i(t)=\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{f}_{ij}(\boldsymbol{u},t)+\boldsymbol{F}_i^{\mathrm{e}}(\boldsymbol{u},t),\ I_i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i(t)=\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{r}_{ij}(\boldsymbol{u},t)\times\boldsymbol{f}_{ij}^{\mathrm{t}}(\boldsymbol{u},t),\ i=1,N \tag{2}$$

式中：m_i、I_i 为第 i 个颗粒的质量和转动惯量，$\boldsymbol{\omega}_i$ 为第 i 个颗粒的转动角速度，$\boldsymbol{r}_{ij}$ 是第 i 个颗粒球心到与第 j 个颗粒接触点的向量，n 是与第 i 个颗粒有接触的颗粒个数，N 为所有颗粒数目，$\boldsymbol{f}_{ij}$、$\boldsymbol{f}_{ij}^{\mathrm{t}}$ 是第 i 个颗粒与第 j 个颗粒之间的接触力和切向摩擦力，并且 $\boldsymbol{f}_{ij}=f_{\mathrm{n}}\boldsymbol{n}+\boldsymbol{f}_{ij}^{\mathrm{t}}=f_{\mathrm{n}}\boldsymbol{n}+f_{\mathrm{t}}\boldsymbol{t}$，法向接触力包括弹性接触力和阻尼接触力两部分

$$f_n=f_{\mathrm{n}}^{\mathrm{e}}+f_{\mathrm{n}}^{\mathrm{d}}=k_n\delta_{\mathrm{n}}^{3/2}+c_{\mathrm{n}}\dot{\delta}\mathrm{n} \tag{3}$$

式中：δ_{n} 为两球之间的相互穿透量，k_{n}、c_{n} 为法向接触刚度和阻尼系数

$$\begin{cases}\delta_{\mathrm{n}}=r_i+r_j-|\ x_i-x_j\ |\\ k_{\mathrm{n}}=\dfrac{4}{3}\sqrt{\dfrac{r_ir_j}{r_i+r_j}}\ \dfrac{E_iE_j}{(1-\nu_i^2)E_j+(1-\nu_j^2)E_i}\end{cases} \tag{4}$$

$$c_{\mathrm{n}}=2\alpha\sqrt{\frac{m_1m_2k_{\mathrm{n}}}{m_1+m_2}}\qquad 0<\alpha<1 \tag{5}$$

式中：E 为材料的弹性模量，ν 为泊松比。切向摩擦力利用 Coulomb 摩擦率

$$\begin{cases}|\ f_{\mathrm{t}}\ |=\varepsilon\mu\ |\ F_{\mathrm{n}}\ |, & 0\leqslant\varepsilon<1,\quad \delta_{\mathrm{t}}=0\\ |\ f_{\mathrm{t}}\ |=\mu\ |\ F_{\mathrm{n}}\ |, & \delta_{\mathrm{t}}\neq 0\end{cases} \tag{6}$$

式中：δ_{t} 为切向相对位移，μ 为摩擦系数。

2.3 离散介质有限元方法(D-FEM)

对于每个离散颗粒介质分别进行有限单元剖分，颗粒之间定义接触面相互作用，形成如(1)式的有限元系统。

2.4 有限元-离散元混合方法(FEM-DEM)

在靶体高应力区域(弹丸侵彻区域)，使用 D-FEM 方法，对于每个颗粒体进行有限单元剖分；在低应力区(远离弹丸侵彻区域)，使用 DEM 方法，把每个颗粒作为一个离散单元；在 2 种方法的区域边界上，FEM 颗粒单元外表面与 DEM 颗粒外表面通过接触相互作用。

3 计算模型

半径为 10 mm 的钢球沿竖直方向分别以 100 m/s 和 200 m/s 的速度垂直侵彻回收箱，回收箱的尺寸为长 70 mm、宽 70 mm、高 76 mm，填充 10 000 个球形沙石颗粒，颗粒半径在 1.5～2.5 mm 范围内随机分布，考虑重力作用。弹丸与沙石材料采用 Mises 弹塑型材料模型，材料参数见表 1，沙石与沙石之间、沙石与钢球之间的摩擦系数都取为 0.2。

表 1 钢球和沙石材料参数

Table 1 Material parameters of the steel projectile and the sand target

Material	Mass density /(kg/m^3)	Young's modulus /(GPa)	Poisson's ratio	Yield stress /(MPa)	Tangent modulus /(GPa)
Steel	7 850	205.8	0.29	355	6.5
Sand	2 640	100.0	0.20	280	1.0

首先用 DEM 方法对回收箱中的沙石颗粒在重力作用下进行静力分析，得到沙石颗粒在自重作用下压实的平衡状态，以此状态作为回收靶的初始状态，再采用 DEM、D-FEM、FEM-DEM 方法进行动态

计算。在 FEM-DEM 方法中,对于侵彻路径 1.5 倍钢球半径范围以内的沙石颗粒采用 D-FEM 方法,其它颗粒采用 DEM 方法。

在 C-FEM 方法中,回收靶材料参数的选取缺乏实验数据,存在较大的主观性,作为对比,分别按照两种原则选取材料参数:(1) 与 D-FEM 相同的侵彻深度(C-FEM-DEPT);(2) 与 D-FEM 相同的弹丸最大加速度峰值(C-FEM-ACC)。

4　计算结果与分析

采用 4 种方法计算钢球以 100 m/s 和 200 m/s 的速度垂直侵彻沙石靶的动态过程,图 1～图 12 分别显示了 DEM、D-FEM、FEM-DEM 计算的 $t=1$ ms 时弹和靶的变形情况。可以看出,DEM、D-FEM、FEM-DEM 都能够表现侵彻时表面沙石颗粒的飞溅现象,其中 DEM 预测的沙石颗粒飞溅最为激烈,C-FEM由于没有离散的沙石颗粒,无法模拟飞溅现象。DEM 不能表现颗粒破坏(图 1～图 3),而其它方法可以反映沙石材料的破坏(图 4～图 9),并且随着钢球侵彻速度从 100 m/s 增加到 200 m/s,沙石靶中破坏颗粒的数量而迅速增加。

从图 4～图 9 可以看出,由 D-FEM 和 FEM-DEM 方法得到的弹、靶变形以及表面颗粒的飞溅情况基本相同,当钢球侵彻深度较大时,沙石颗粒从弹孔中部塌陷并埋没弹丸(图 9)。

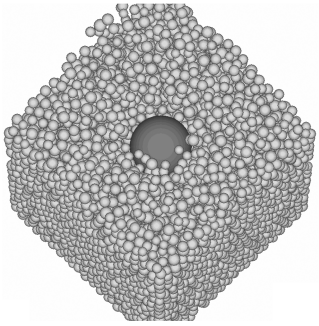


图 1　1 ms 时弹和靶
(DEM,$v_0=100$ m/s)
Fig. 1　The projectile and the target at 1 ms (DEM,100 m/s)

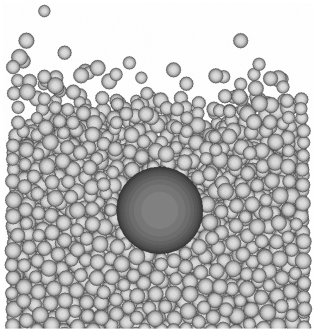


图 2　1 ms 时弹和靶的剖视图
(DEM,$v_0=100$ m/s)
Fig. 2　Cutaway view of the projectile and the target at 1 ms (DEM,100 m/s)

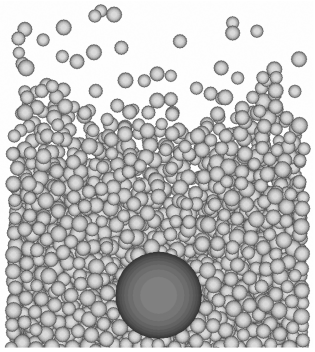


图 3　1 ms 时弹和靶的剖视图
(DEM,$v_0=200$ m/s)
Fig. 3　Cutaway view of the projectile and the target at 1 ms (DEM,200 m/s)

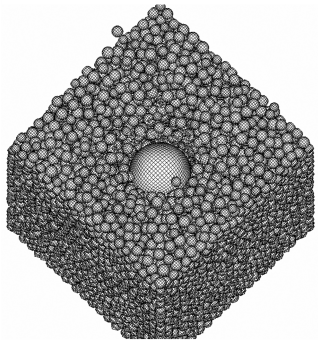


图 4　1 ms 时弹和靶
(D-FEM,$v_0=100$ m/s)
Fig. 4　The projectile and the target at 1 ms (D-FEM,$v_0=100$ m/s)

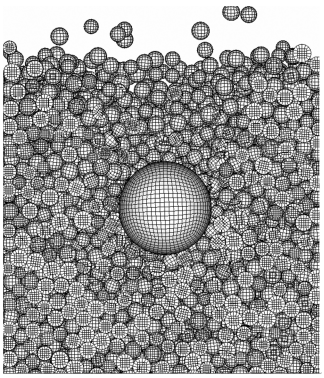


图 5　1 ms 时弹和靶的剖视图
(D-FEM,$v_0=100$ m/s)
Fig. 5　Cutaway view of the projectile and the target at 1 ms (D-FEM,$v_0=100$ m/s)

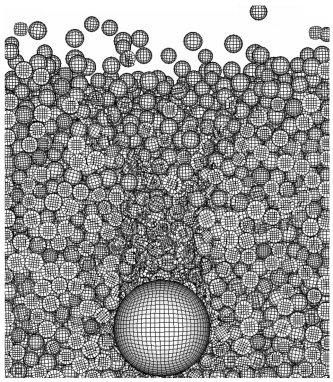


图 6　1 ms 时弹和靶的剖视图
(D-FEM,$v_0=200$ m/s)
Fig. 6　Cutaway view of the projectile and the target at 1 ms (D-FEM,$v_0=200$ m/s)

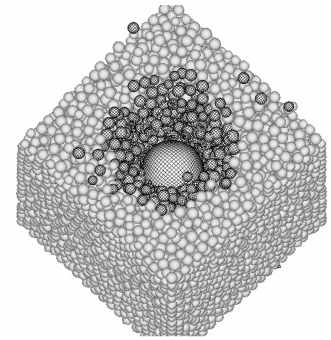


图 7 1 ms 时弹和靶
(FEM-DEM, v_0 = 100 m/s)
Fig. 7 The projectile and the target at 1 ms
(FEM-DEM, v_0 = 100m/s)

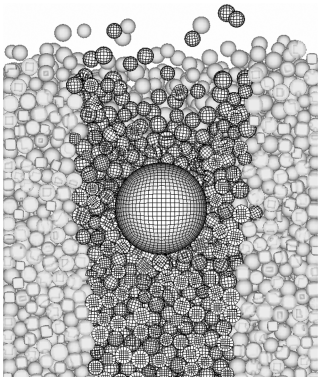


图 8 1 ms 时弹和靶剖视图
(FEM-DEM, v_0 = 100 m/s)
Fig. 8 Cutaway view of the projectile and the target at 1 ms
(FEM-DEM, v_0 = 100 m/s)

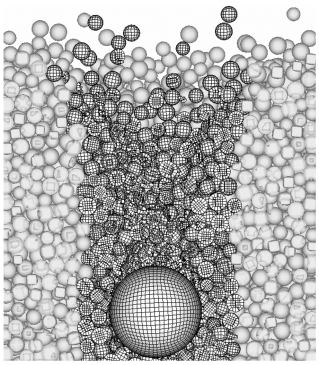
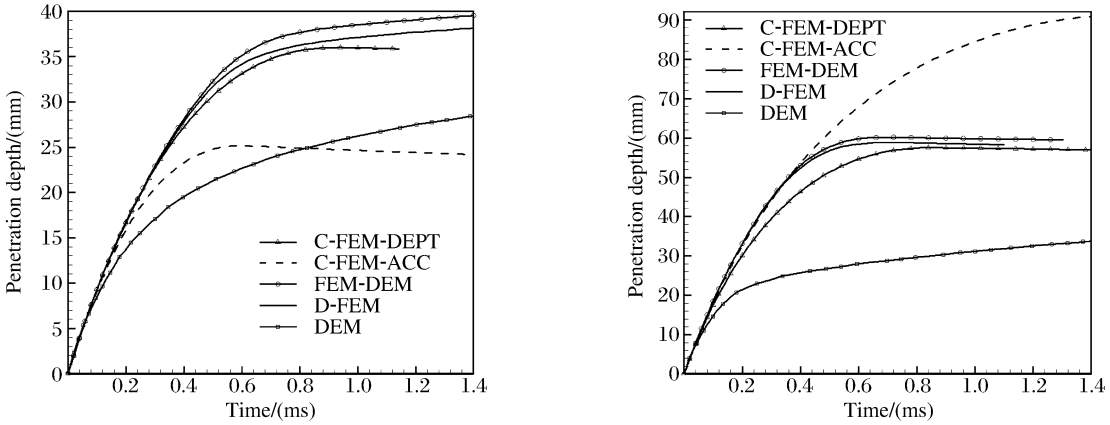


图 9 1 ms 时弹和靶剖视图
(FEM-DEM, v_0 = 200 m/s)
Fig. 9 Cutaway view of the projectile and the target at 1 ms
(FEM-DEM, v_0 = 200 m/s)

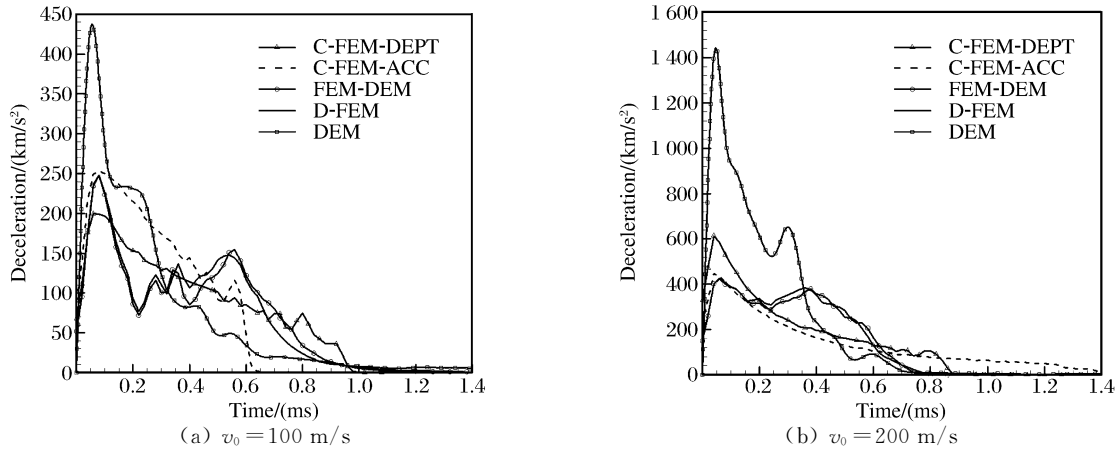
图 10 和图 11 显示了 4 种方法得到的弹丸侵彻深度曲线和加速度曲线,从中可以看出,D-FEM、FEM-DEM的结果基本相同,而DEM的弹丸穿深比前两者要小很多,当侵彻速度为100m/s和200 m/s时



(a) v_0 = 100 m/s (b) v_0 = 200 m/s

图 10 弹体侵彻深度时间历程曲线

Fig. 10 Projectile penetration depth-time histories



(a) v_0 = 100 m/s (b) v_0 = 200 m/s

图 11 弹体加速度时间历程曲线

Fig. 11 Projectile deceleration-time histories

分别减小约 26%和 47%;但是弹丸加速度峰值却比前两者要高很多,当侵彻速度为 100 m/s 和 200 m/s 时分别增大约 76%和 227%。C-FEM 精度最低,如果根据侵彻深度选取靶材料参数(C-FEM-DEPT),则加速度误差很大,如果根据加速度峰值选择靶材料参数(C-FEM-ACC),则侵彻深度误差很大。4 种方法(DEM∶D-FEM∶FEM-DEM∶C-FEM)的相对计算规模为 1∶230∶41∶4,相对计算效率为 1∶79∶16∶2。

总之,C-FEM 无法得到合理的结果,不适合于离散颗粒体侵彻问题计算;DEM 计算精度低,但是计算规模小、计算效率高;D-FEM 计算精度高,但是计算规模大、效率低;FEM-DEM 精度高、计算规模和计算效率适中,是计算颗粒体侵彻问题比较理想的方法。

5　结 束 语

采用 C-FEM、DEM、D-FEM 和 FEM-DEM 4 种数值计算方法,分别模拟了钢球以 100 m/s 和 200 m/s的速度垂直侵彻沙石颗粒回收靶问题,得到了弹靶变形情况以及弹丸侵彻深度时间曲线和加速度时间曲线,通过比较分析 4 种方法的计算精度、计算规模和计算效率,证明了 FEM-DEM 能够综合 DEM 高效性和 D-FEM 精确性的优点,在计算存在材料破坏的颗粒体侵彻问题时,具有较好的效果。

References:

[1] Liu X H, Liu J, Wang C, et al. Experimental Studies on the Projectile Penetrating Normally into a Plain Concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(4): 324-328. (in Chinese)
刘小虎,刘　吉,王　乘,等. 弹丸低速垂直侵彻无钢筋混凝土的实验研究 [J]. 爆炸与冲击,1999,19(4):324-328.

[2] Gu X H, Wang X M, Chen H W, et al. Experimental Study on the Kinetic Energy Penetrations against Semi-Infinite Concrete Targets [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(1): 103-108. (in Chinese)
顾晓辉,王晓鸣,陈惠武,等. 动能侵彻体垂直侵彻半无限厚混凝土靶的试验研究 [J]. 实验力学,2004,19(1):103-108.

[3] Xu P, Zu J, Fan J B. Study on Acceleration Test Technique of High Velocity Kinetic Energy Projectile Penetrating [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(11): 118-122. (in Chinese)
徐　鹏,祖　静,范锦彪. 高速动能弹侵彻硬目标加速度测试技术研究 [J]. 振动与冲击,2007,26(11):118-122.

[4] Belytschko T, Liu W K, Moran B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures [M]. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2000.

[5] Cundall P A, Strack O D L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies [J]. Geotech, 1979, 29(1): 47-65.

[6] Tang Z P. 3D Discrete Element Method and Its Applications in Impact Mechanics [J]. Science in China, Series E, 2003, 33(11): 989-998. (in Chinese)
唐志平. 三维离散元方法及其在冲击力学中的应用 [J]. 中国科学(E 辑),2003,33(11):989-998.

[7] Mohammadi S, Owen D R J, Peric D. A Combined Finite/Discrete Element Algorithm for Delamination Analysis of Composites [J]. Finite Elements Analy Design, 1998, 28: 321-336.

[8] Onate E, Rojek J. Combination of Discrete Element and Finite Element Methods for Dynamic Analysis of Geomechanics Problems [J]. Comput Meth Appl Mech Eng, 2004, 193: 3087-3128.

Study on Numerical Methods for Particle Material Penetration Problems

LIU Xiao-Hu, ZHU Tao

(*Department of Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: Four numerical methods, i. e., purely Continuum based Finite Element Method (C-FEM), Discrete Element Method (DEM), Discrete particle based Finite Element Method (D-FEM) and combination of FEM and DEM (FEM-DEM), were explored through numerical examples of steel sphere normally impacting on the sand target at 100 m/s and 200 m/s velocities. Comparing computing efficiencies and precisions of the methods, it is shown that FEM-DEM is the most suitable to simulate problems of sand target penetration.

Key words: penetration; particle material; soft recycle; discrete element; finite element