



## 论文

## 基于离散单元法的发射装药挤压破碎动力学仿真

姜世平, 芮筱亭\*, 王燕, 黎超

南京理工大学发射动力学研究所, 南京 210094

\*联系人, E-mail: ruixt@163.net

收稿日期: 2012-09-21; 接受日期: 2013-05-15

国家自然科学基金(批准号: 10902051)和国防重点实验室基金(编号: 9140C350406120C35133)资助项目

**摘要** 为了探寻发射装药低温下挤压破碎机理, 研究发射装药挤压破碎对发射安全性的影响, 本文利用离散单元法模拟了发射装药动态挤压破碎过程. 将发射药粒离散成弹簧-球单元系统, 建立了发射药床挤压破碎动力学模型, 仿真了发射药床在动态冲击载荷下的挤压破碎动力学过程. 采用统计的方法定量地获得了破碎后发射药床的表面积, 其结果与试验较为接近, 验证了本文理论与模型的正确性. 研究结果为进一步研究发射装药低温下挤压破碎对发射安全性的影响奠定了基础.

**关键词** 发射装药, 挤压破碎, 离散单元法, 仿真

**PACS:** 45.70.-n, 45.70.Mg, 45.70.Vn

**doi:** 10.1360/132012-797

现代战争对武器性能提出了越来越高的要求, 膛炸、早炸等发射安全性问题严重制约了以高装填密度、高膛压、高初速为特征的现代高性能武器的发展. 发射装药引起膛炸的主要原因是由于弹底药床被点燃前受到颗粒间挤压应力的作用, 产生了破碎, 引起了发射药燃面的急增, 从而使发射药的燃气生成速率猛增, 严重时使局部气体压力超过炮膛容许压力, 产生膛炸<sup>[1]</sup>.

发射药床是由大量发射药粒组成的系统, 称之为散体系统<sup>[1]</sup>. 低温下(-40°C), 发射药粒成脆性, 脆性材料的冲击破坏过程实质是从连续体到非连续体的转变过程. Cundall<sup>[2]</sup>提出离散单元法为研究散体系统动力学提供了有力工具. 离散单元法把整个散体系统看成是离散单元的组合, 每个离散单元为一个

刚体, 根据单元间的相互作用和牛顿第二定律描述散体系统的运动. 经过四十年的发展, 该方法已在散体力学、岩土工程、结构工程等领域得到了广泛的应用<sup>[3-5]</sup>. 芮筱亭等人<sup>[6]</sup>采用有限元法分析了发射药粒在冲击载荷下的破碎模式; Heiser 等人<sup>[7]</sup>采用 LS-DYNA 编码对多种发射药在不同载荷下的力学效应进行了数值模拟. 由于发射药床在膛内力学环境下的破碎过程极为复杂, 目前的研究方法主要以试验手段为主, 理论上分析药粒破碎规律的研究甚少. 这是因为发射装药挤压破碎动力学既面临物体数量巨大这一多体动力学难题, 又同时面临单元挤压破碎这一固体力学难题.

本文基于离散单元法, 将发射药粒离散成弹簧-球单元系统, 建立了发射药床挤压破碎动力学模型,

**引用格式:** 姜世平, 芮筱亭, 王燕, 等. 基于离散单元法的发射装药挤压破碎动力学仿真. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 965-970  
Jiang S P, Rui X T, Wang Y, et al. Dynamics simulation of gun propellant charge with compress and fracture based on discrete element method (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 965-970, doi: 10.1360/132012-797

编制了发射药床挤压破碎仿真程序, 模拟了发射药床挤压破碎动力学过程. 本文研究成果为进一步研究发射药床的挤压破碎规律和发射装药低温下挤压破碎对发射安全性的影响奠定了基础.

## 1 发射药床挤压破碎动力学模型

发射药床动态压缩试验装置如图 1(a)所示, 该装置主要包括: 燃烧室、传动活塞、装药室和底座, 装药室中含有大量的发射药颗粒, 如图 1(b)所示. 试验时, 在燃烧室中加入火药, 燃烧后生成的高压气体推动活塞, 高速运动的活塞挤压装药室内的发射药床, 在冲击载荷作用下, 装药室内的发射药床发生了破碎, 如图 1(c)所示, 这一过程模拟了火炮发射过程中弹底发射装药的挤压破碎过程. 本文针对低温下 ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) 动态压缩试验装置中的发射药床在冲击载荷作用下的破碎过程进行了数值仿真.

## 2 发射药床离散模型及运动方程

装药室中发射药床的密实堆积模型如图 2(a)所示, 在仿真计算过程中, 将每个发射药颗粒离散成多个等直径的刚性球单元系统, 如图 2(b)所示, 任意相邻的两个球体单元之间由一个弹簧组连接, 弹簧组包括一个法向弹簧和两个切向弹簧, 每个小球单元

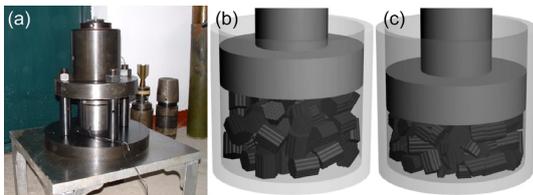


图 1 (网络版彩图) 发射药床动态压缩试验装置及发射药床动力学模型

Figure 1 (Color online) Dynamic compression device and dynamics model of propellant bed.

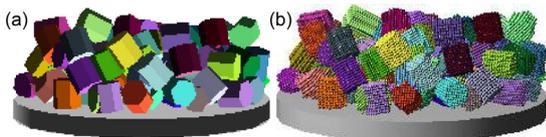


图 2 (网络版彩图) 发射药床的堆积模型及离散模型

Figure 2 (Color online) Packing structure of propellant bed and its discrete model.

为发射药粒挤压破碎时的最小单位. 发射药粒在外界载荷下的塑性变形和破坏通过球体单元之间弹簧的变形和断裂来体现.

### 2.1 球体单元系统的运动方程

建立如图 3 所示的全局坐标系  $OXYZ$ , 任取单元  $i$  为研究对象, 单元  $i$  可能同时和多个单元接触, 任取接触单元  $j$ . 取单元  $i$  的球心  $o$  作为局部坐标系的原点, 以单元  $i$  的中心指向单元  $j$  的中心为  $x$  轴, 过球心  $o$  取一平行于  $X-Y$  平面且垂直于  $x$  轴的直线为  $y$  轴,  $z$  轴由右手螺旋法则确定, 局部坐标系  $oxyz$  如图 3 所示.

根据牛顿运动定律, 单元  $i$  在全局坐标系  $OXYZ$  中的平动方程为

$$m_i \ddot{\mathbf{l}}_i = \sum_j \mathbf{f}_{ij} + \mathbf{f}_i. \quad (1)$$

由动量矩定理, 单元  $i$  在局部坐标系  $oxyz$  中的转动方程为

$$J_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_j \mathbf{M}_{ij} + \mathbf{M}_i, \quad (2)$$

式中  $m_i$  为单元  $i$  的质量,  $\ddot{\mathbf{l}}_i$  为单元  $i$  的质心线加速度,  $\mathbf{f}_{ij}$  为单元  $i$  受到接触单元  $j$  的接触力,  $\mathbf{f}_i$  为单元  $i$  所受除接触力以外的外力,  $J_i$  为单元  $i$  的转动惯量,  $\boldsymbol{\omega}_i$  为单元  $i$  的角速度,  $\mathbf{M}_{ij}$  为单元  $i$  与单元  $j$  接触所产生的接触力矩,  $\mathbf{M}_i$  为单元  $i$  所受除接触力矩以外的外力矩.

### 2.2 球体单元系统的接触模型

当单元  $i$  和  $j$  接触时, 在法线和切线方向上, 假设其弹性效应等效于弹簧-阻尼器作用, 如图 4 所示. 法线、主切线及次切线方向的刚度系数分别为  $k_{ij}^n, k_{ij}^s$

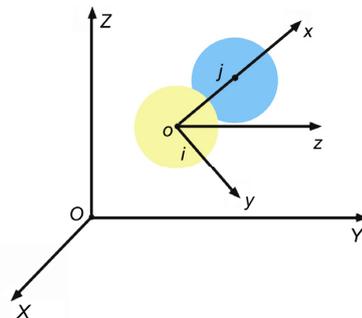


图 3 (网络版彩图) 坐标系及单元接触情况

Figure 3 (Color online) Coordinate system and contact status of elements.

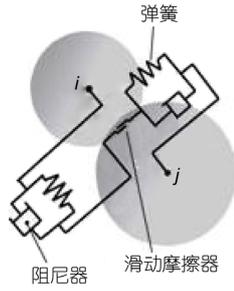


图4 接触模型

Figure 4 Contact model of spherical bodies.

和  $k_{ij}^b$ , 阻尼系数分别为  $c_{ij}^n, c_{ij}^s$  和  $c_{ij}^b$ , 具体计算公式参见文献[8]. 法向接触力  $f_{ij}^n$  可表示为<sup>[9]</sup>

$$f_{ij}^n = -k_{ij}^n \cdot \Delta \delta_n^\alpha \mathbf{n}_{ij} - c_{ij}^n \cdot \mathbf{v}_{ij}^n \quad (3)$$

式中  $\Delta \delta_n = r_i + r_j - r_{ij}$  为单元间法向相对变形量,  $r_i, r_j$  分别为单元  $i$  和  $j$  的半径,  $r_{ij}$  为二球心之间的距离; 指数  $\alpha$  反映了接触的性质, 对球体之间的接触, 取  $\alpha = 3/2$ <sup>[10]</sup>,  $\mathbf{n}_{ij}$  为法向单位矢量, 方向由  $i$  指向  $j$ ,  $\mathbf{v}_{ij}^n$  为单元间接触点的相对速度矢量在法向的分量, 可由下式求得

$$\mathbf{v}_{ij}^n = ((\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j - (\boldsymbol{\omega}_i r_i + \boldsymbol{\omega}_j r_j) \times \mathbf{n}_{ij}) \cdot \mathbf{n}_{ij}) \mathbf{n}_{ij} \quad (4)$$

$\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$  分别为单元  $i$  和  $j$  的质心速度;  $\boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_j$  分别为单元  $i$  和  $j$  的角速度.

对于切向接触, 由于在接触过程中有可能发生从静止到滑移或者由滑移到静止的过渡, 所以接触模型应采用增量形式

$$\begin{cases} f_{ij}^s(t) = f_{ij}^s(t - \Delta t) - k_{ij}^s v_{ij}^s \Delta t - c_{ij}^s v_{ij}^s, \\ f_{ij}^b(t) = f_{ij}^b(t - \Delta t) - k_{ij}^b v_{ij}^b \Delta t - c_{ij}^b v_{ij}^b. \end{cases} \quad (5)$$

$f_{ij}^s, f_{ij}^b$  分别为单元  $i$  在  $t$  时刻所受的切向接触力在主、次切线方向上的分量;  $v_{ij}^s, v_{ij}^b$  分别为单元间接触点的相对速度在主、次切线方向上的分量. 当切向接触力大于最大静摩擦力时, 球体单元之间产生滑移, 由库仑摩擦定律可知, 此时切向接触力在主、次切线方向上的分量分别为

$$\begin{cases} f_{ij}^{ts} = \mu |f_{ij}^n| \cdot \frac{f_{ij}^s}{\sqrt{|f_{ij}^s|^2 + |f_{ij}^b|^2}}, \\ f_{ij}^{tb} = \mu |f_{ij}^n| \cdot \frac{f_{ij}^b}{\sqrt{|f_{ij}^s|^2 + |f_{ij}^b|^2}}. \end{cases} \quad (6)$$

$\mu$  为单元间滑动摩擦系数.

### 3 弹性力计算模型

被离散后的发射药粒由多个等直径的小球单元组成, 任意相邻的两个小球单元之间由一个弹簧组连接, 当两个相邻的小球单元之间处于弹簧连接状态时, 弹簧组变形产生的弹性力按下式计算:

$$\begin{cases} F_{n,ij}(t) = F_{n,ij}(t - \Delta t) + k_{n,ij} \Delta u_1, \\ F_{s1,ij}(t) = F_{s1,ij}(t - \Delta t) + k_{s1,ij} \Delta u_2, \\ F_{s2,ij}(t) = F_{s2,ij}(t - \Delta t) + k_{s2,ij} \Delta u_2. \end{cases} \quad (7)$$

式中  $k_{n,ij}, k_{s1,ij}, k_{s2,ij}$  分别为法向弹簧和两个切向弹簧的刚度系数,  $\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3$  分别为法向弹簧和两个切向弹簧的变形量. 针对弹簧组刚度系数的选取, 文献[5,11,12]给予了详细的推导和研究.

### 4 发射药粒破坏准则

一般来说, 发射药床在冲击载荷下的破坏过程异常复杂, 发射药粒可能会发生拉伸、压缩与剪切破坏. 当拉伸、压缩或剪切力超过弹簧的拉伸强度  $F_s$ 、压缩强度  $F_c$  或粘着力  $F$  时, 弹簧断裂. 弹簧的拉伸强度、压缩强度与粘着力可以根据目黑等人<sup>[13]</sup>提出的与应变率  $\dot{\epsilon}_c$  有关的破坏参数获得

$$\begin{cases} F_s = [0.8743 - 0.02987 \log \dot{\epsilon}_c + 0.04379 (\log \dot{\epsilon}_c)^2] \cdot f_s \cdot r, \\ F_c = [1.021 - 0.05076 \log \dot{\epsilon}_c + 0.02583 (\log \dot{\epsilon}_c)^2] \cdot f_c \cdot r, \\ F = c \cdot \sqrt{(F_s / f_s \cdot r) \cdot (F_c / f_c \cdot r)}. \end{cases} \quad (8)$$

式中  $r$  为离散单元的半径,  $f_s, f_c, c$  分别为静载条件下发射药粒的拉伸强度、压缩强度与粘着力强度, 可以通过试验获得.

弹簧断裂意味着产生裂纹, 当连结球体单元的所有弹簧都断裂时, 球体单元从连续体中分离出来, 发射药粒发生了破碎.

## 5 发射药床挤压破碎动力学仿真

### 5.1 发射药床挤压破碎试验

发射药床动态压缩试验前, 模拟药室中含有 97 颗完好的 15/19 单基发射药, 如图 5(a)所示, 试验后

获得的破碎发射药如图 5(b)所示. 图 6 为发射药床动态压缩试验过程中测得的燃烧室内压力曲线.

发射药床破碎后, 导致火药床的燃烧表面积增加. 将完好的发射药床与动态压缩后的破碎发射药床, 分别放入密闭爆发器中进行动态活度试验, 其起始动态活度比<sup>[1]</sup>(破碎发射药对完好发射药的面积比)曲线如图 7 所示, 其中横坐标是破碎发射药对完好发射药的压力比, 纵坐标是破碎发射药对完好发射药

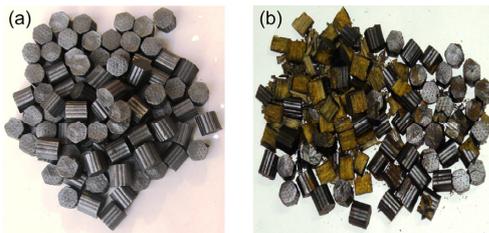


图 5 (网络版彩图)完好的发射药床及挤压后的发射药床  
Figure 5 (Color online) The propellant bed before and after compress.

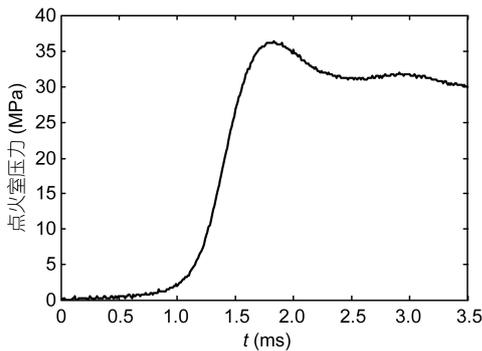


图 6 燃烧室压力曲线  
Figure 6 The pressure curve of firebox.

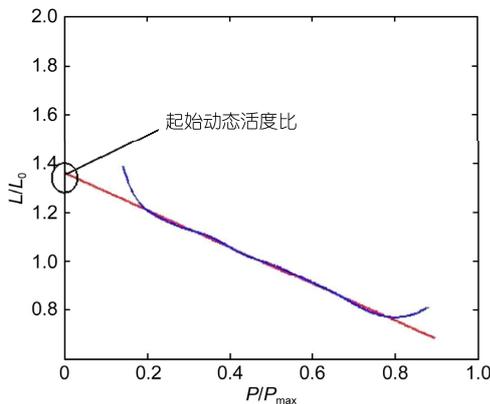


图 7 (网络版彩图)起始动态活度比曲线  
Figure 7 (Color online) The curve of initial dynamic vivacity ratio.

的面积比, 拟合直线的截距(拟合直线与纵坐标轴的交点)为 1.3685, 即破碎后的发射药床表面积增加量为 36.85%.

## 5.2 发射药床挤压破碎动力学仿真

应用上述方法, 以图 6 中的燃烧室压力作为冲击载荷, 仿真了发射药床的挤压破碎动力学过程. 装药室中的发射药床被离散成大量的小球单元, 任意时刻每个单元的运动由牛顿-欧拉方程描述; 对于由弹簧连接的单元, 弹性力计算采用式(7), 当拉伸、压缩或剪切力达到弹簧最大承载极限时弹簧断裂, 弹簧断裂参数参照式(8). 当球体单元之间接触时, 法向接触力和切向接触力分别采用式(3)与式(5)来计算, 球体单元与边界的接触力模型与球体之间的接触力模型一致; 相关仿真参数如表 1 所示. 图 8 为采用 OpenGL 显示的计算结果动画显示在不同时刻截取的图片.

为了分析发射药粒的离散单元尺寸对计算结果的影响, 在相同的初始堆积状态下, 当离散单元的半

表 1 计算参数  
Table 1 Computation parameters

| 参数                         | 数值                |
|----------------------------|-------------------|
| 发射药粒密度 ( $\text{kg/m}^3$ ) | $1.6 \times 10^3$ |
| 离散单元数                      | 187×97            |
| 离散小球单元半径 (mm)              | 0.6               |
| 弹性模量 (MPa)                 | $1.0 \times 10^3$ |
| 泊松比                        | 0.26              |
| 弹簧拉伸强度 (N)                 | $1.2 \times 10^3$ |
| 弹簧压缩强度 (N)                 | $3.6 \times 10^3$ |
| 粘着力 (N)                    | $1.5 \times 10^3$ |
| 单元间摩擦系数                    | 0.1               |
| 单元边界间摩擦系数                  | 0                 |
| 时间步长 (s)                   | $10^{-6}$         |
| 时间长度 (ms)                  | 3.5               |

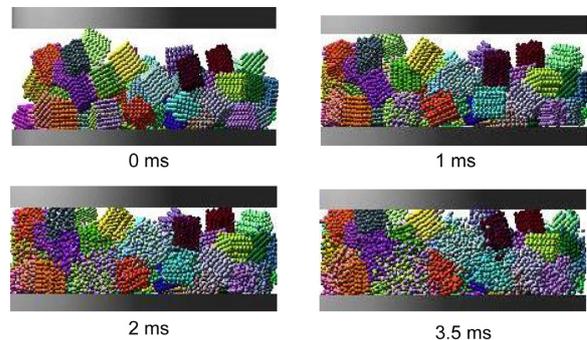


图 8 (网络版彩图)不同时刻发射药床破碎状况  
Figure 8 (Color online) The fragmentation of propellant bed at different time.

径为 0.15 mm 时, 此时每颗发射药粒被离散成 737 个小球单元, 根据文献[5], 由于弹簧的刚度系数和断裂系数与离散单元的尺寸相关, 除弹簧刚度与断裂系数相应地减小之外, 其他计算参数不变. 在图 6 所示的冲击载荷下, 计算结果如图 9 所示.

发射药粒破碎后, 发射药床的表面积增加, 这是发射安全性最为关心的问题. 但是, 由于破碎后的发射药形状异常复杂, 难以通过理论精确计算其表面积的变化. 只能通过跟踪每一个药粒在不同时刻破碎情况, 根据某些假设来统计其表面积. 统计原则如下:

(1) 若药粒在挤压过程中没有发生破碎, 则药粒的表面积按六棱柱表面积计算;

(2) 若药粒在挤压过程中发生破碎, 对于它的每个碎块, 以一个空间球体将其包裹, 而球体的表面积计算是非常简单的. 由于每个碎块由若干个离散单元组成, 其中相距最远的两个单元的球心距离加上它们半径的 2 倍就是包裹该碎块的空间球体的直径.

根据以上原则, 对不同时刻每一发射药粒破碎情况进行统计. 每颗完好发射药粒的表面积为  $5.82 \text{ cm}^2$ , 初始发射药床的表面积为  $564.54 \text{ cm}^2$ . 图 10 为两种离散半径下发射药床在不同时刻表面积增加统计量, 当离散单元的半径为 0.6 mm 时, 发射药床破碎后的表面积为  $739.83 \text{ cm}^2$ , 其表面积增加量为 31.05%; 当离散单元的半径为 0.15 mm 时, 发射药床破碎后的表面积为  $752.19 \text{ cm}^2$ , 其表面积增加量为 33.24%. 而试验结果表明破碎后的发射药床表面积增加量为 36.85%, 两种离散模型的计算结果都与试验结果较为接近, 但离散单元半径为 0.15 mm 时, 发射药床破碎的更为严重一些, 其计算结果更为准确.

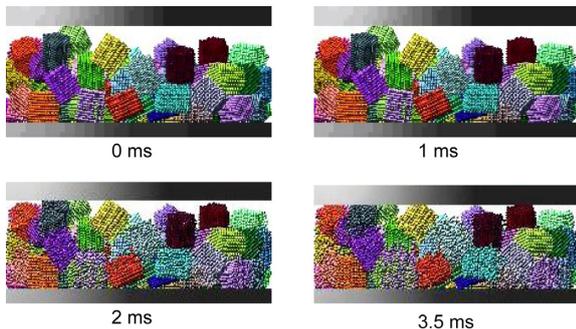


图 9 (网络版彩图) 离散小球半径为 0.15 mm 时的挤压破碎状况

Figure 9 (Color online) The fragmentation of propellant bed with the radius of the spherical element is 0.15 mm.

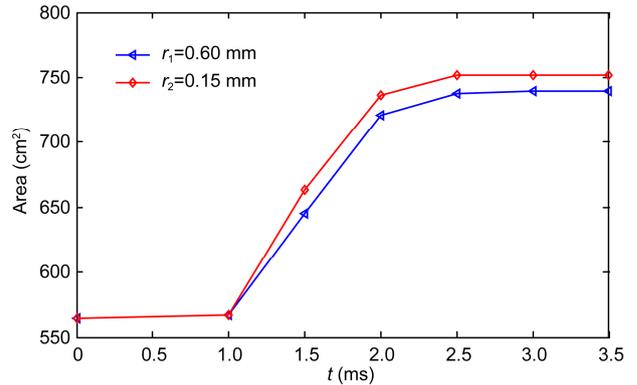


图 10 (网络版彩图) 破碎发射药床在不同时刻的表面积增加量

Figure 10 (Color online) The increment surface area of propellant bed.

这表明了离散单元半径的选取不能过大, 否则在外界载荷下发射药粒产生的局部破碎得不到体现. 因为计算过程中是以离散小球单元为最小破碎单位, 若离散单元的半径选取过大, 那些体积远小于离散单元的粉末, 在仿真计算过程中则被忽略, 而实际试验过程中存在着大量粉末状的碎小块体, 这些碎小块体对发射药床表面积增加量的贡献很大, 所以发射药粒的微观破碎没有被体现出来, 导致表面积增加统计量偏小.

仿真结果与试验结果之间的误差是由多种原因造成的, 包括计算参数、接触力计算模型、弹簧的断裂准则及离散单元半径的选取等多种因素. 还有一点不容忽视的就是发射药床不同的初始堆积构型对计算结果的影响也是比较明显的, 试验过程中发射药床的初始堆积构型是确定的, 而仿真过程中, 发射药床的初始堆积构型是随机的, 二者堆积构型的不同会造成试验结果与仿真计算结果之间的误差, 这一现象在试验过程经常出现.

## 6 结论

本文以三维离散单元法为基础, 将发射药粒离散成弹簧-球单元系统, 以相应的破坏准则判断发射药粒的破碎, 数值仿真了发射药床挤压破碎动力学过程, 并采用统计的方法定量地获得了破碎发射药床的表面积增加量, 其结果与试验较为接近, 验证了本文方法的可行性和正确性, 为进一步计算火炮膛内弹底发射药床的破碎提供了理论基础和计算平台.

## 参考文献

- 1 芮筱亭, 负来峰, 王国平, 等. 弹药发射安全性导论. 北京: 国防工业出版社, 2009
- 2 Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movement in block rock system. Symposium ISRM, 1971, 2: 129-136
- 3 Carmona H A, Wittel F K, Kun F, et al. Fragmentation process in impact of spheres. Phys Rev, 2008, 77(5): 051302
- 4 Harireche O, Mcdowell G R. Discrete element modeling of cyclic loading of crushable aggregates. Granular Matter, 2003, 5 (13):147-151
- 5 Liu K X, Zheng W G, Gao L T. Numerical simulation for the dynamic failure process in brittle materials (in Chinese). Chin J Comput Mech, 2003, 20(2): 127-132 [刘凯新, 郑文刚, 高凌天. 脆性材料动态破坏过程的数值模拟. 计算力学学报, 2003, 20(2): 127-132]
- 6 Rui X T, Liu J, Chen T, et al. Dynamic analysis on the extrusion and rupture of propellants (in Chinese). Acta Armamentarii, 2004, 25(6): 679-683 [芮筱亭, 刘军, 陈涛, 等. 发射药挤压破碎动力学分析. 兵工学报, 2004, 25(6): 679-683]
- 7 Heiser R, Wolf K. About the mechanical strength of propellant grains: Numerical simulation. In: the Proceedings of 16<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics. San Francisco: 1996. 135-142
- 8 Mishra B K, Murty C V R. On the determination of contact parameters for realistic DEM simulation of ball mills. Powder Technol, 2001, 115: 290-297
- 9 Kruggel-Emden H, Wirtz S, Scherer V. Applicable contact model for the discrete element method: The Single Particle Perspective. In: the Proceedings of Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2008). Chicago: University of Illinois, 2008
- 10 马炜. 散体介质冲击载荷作用下力学行为理论分析与算法实现. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2008
- 11 Zang M Y, Lei Z, Wang S E. Investigation of impact fracture behavior of automobile laminated glass by 3D discrete element method. Comput Mech, 2007, 41: 73-83
- 12 Jiang S P, Rui X T, Hong J, et al. Numerical simulation of impact breakage of gun propellant charge. Granular Matter, 2011, 4: 79-91
- 13 目黑公郎, 博野元彦. 用粒状体模拟混凝土结构的破坏分析. 东京大学地质研究所汇报, 1991, 63(4): 409-468

# Dynamics simulation of gun propellant charge with compress and fracture based on discrete element method

JIANG ShiPing, RUI XiaoTing\*, WANG Yan & LI Chao

*Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*

In order to reveal the mechanism of compress and fracture of gun propellant charge at low temperature, and study the effect of compress and fracture of gun propellant charge to launch safety, the dynamics process of compress and fracture of gun propellant is simulated by discrete element method. By dividing propellant grains into spring-spheres system, the dynamics model of compress and fracture of gun propellant charge is founded, and the dynamics process of compress and fracture of gun propellant bed under impact load is simulated. The surface area of propellant bed after fragmentation is quantificationally acquired by statistical method, the simulation result and the test result have a good agreement with each other, which indicates the computational method is accurate. These results provide a theoretical foundation for the further study of the affect of compress and fracture of gun propellant charge at low temperature to launch safety.

**gun propellant charge, compress and fracture, discrete element method, simulation**

**PACS:** 45.70.-n, 45.70.Mg, 45.70.Vn

**doi:** 10.1360/132012-797