文章编号：1001-1455(2014)05-0560-07 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)05-0560-07

初始堆积对发射药床底部挤压应力的影响*

王 燕[1]，芮筱亭[1]，宋振东[2]，黎 超[1]，姜世平[1]，冯宾宾[1]，王国平[1]

（1.南京理工大学发射动力学研究所，江苏 南京 210094；
2.总装备部通保部军械局，北京 100720）

摘要：为给发射装药发射安全性的评估提供关键数据，对不同初始堆积发射药床进行了挤压破碎实验，测得了发射药床底部的挤压应力。利用离散单元法，建立了发射装药挤压破碎动力学模型，对发射药床的挤压应力进行了计算。实验结果和计算结果吻合较好。随机堆积药床底部的挤压应力较一致，竖排堆积药床底部的挤压应力差异较大。

关键词：爆炸力学；挤压应力；动态挤压；发射药床；初始堆积

中图分类号：O383 **国标学科代码**：1303510 **文献标志码**：A

目前，对发射装药引起的膛炸等发射安全事故的机理已逐步形成共识：即相应装药结构下的发射装药挤压破碎是导致膛内超高压力是引发膛炸的根本原因。发射装药膛内挤压破碎是药粒的低温脆性和弹底发射装药着火前受到挤压作用的共同结果[1-3]，测试弹底发射药床挤压应力和获得破碎程度是评定发射装药发射安全性的关键。发射药床由颗粒状发射药粒堆积而成，在药筒内分布不均匀、不密实，药床的初始堆积具有随机性。目前国内外都无法重现获取在膛内的破碎过程。

本文中通过发射装药动态挤压破碎实验，以相同的动态载荷作用于不同初始堆积的发射药床上，观测药床底部挤压应力的变化情况，并应用挤压破碎动力学理论对不同初始堆积的发射药床进行数值计算。实验和计算结果均表明，发射药床的初始药床为随机堆积时，药床底部的挤压应力较一致，但当初始堆积为竖排时药床底部的挤压应力大于随机堆积的，研究结果可为进一步研究发射药床的破碎规律提供理论基础和计算手段。

1 发射装药动态挤压破碎实验装置

发射装药动态挤压破碎实验装置与原理图，如图 1 所示[4]，该装置主要包括：燃烧室、活塞、模拟药室和底座，模拟药室中装有大量的发射药颗粒。实验时，在燃烧室中加入一定量的火药，燃烧后生成的高压气体推动活塞，高速运动的活塞快速挤压模拟药室内的发射装药，在冲击载荷作用下模拟药室内的发射药床发生破碎，该实验的目的在于模拟火炮发射过程中弹底发射药床的挤压破碎情况，进而获得相应力学环境下的挤压破碎发射药床和药床底部挤压应力[5]。实验所获得的挤压应力为药床底部面积上应力分布的平均值。

在发射装药动态挤压破碎实验中，必须做到发射药床的底部挤压应力与火炮发射过程中弹底发射药床的挤压应力尽可能一致。图 2 所示为由发射装药动态挤压破碎实验得到的药床底部挤压应力与火炮膛内力学环境实验实测的弹底发射药床的挤压应力。实验结果的对比表明，2 条曲线形状很相似，上升段吻合较好，说明了发射装药挤压应力时间历程实验结果与射击实测结果基本一致。

* **收稿日期**：2013-04-01；**修回日期**：2013-05-27
基金项目：国家自然科学基金项目(11102089)；高校博士点基金项目(20113219110025)；
新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0075)；
江苏省博士研究生科研创新培养基金项目(CXZZ12_0216)
作者简介：王 燕(1986—)，女，博士研究生。

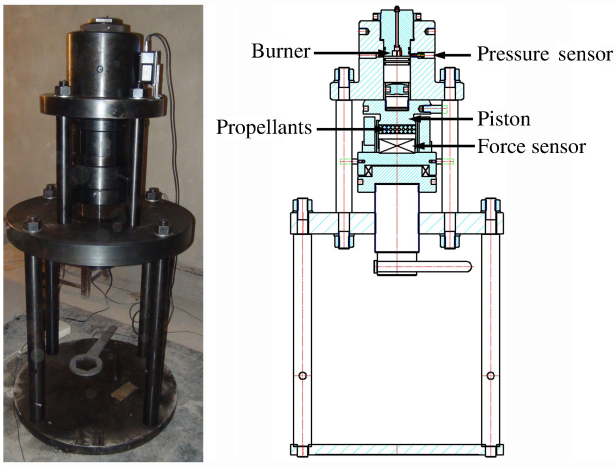

图 1　发射装药动态挤压破碎实验装置

Fig. 1　Schematic of dynamic compression fracture experimental device

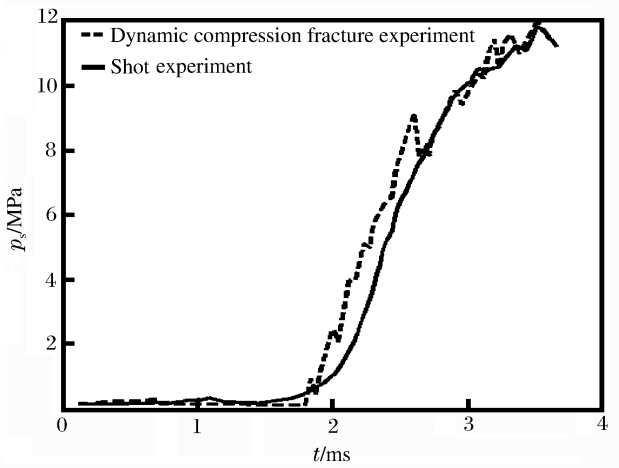

图 2　发射药床底部挤压应力时间曲线

Fig. 2　Comparison of stress at the bottom between dynamic compression fracture and shot experiment

2　发射药床底部挤压应力测试

以某新型发射药为研究对象，在实验过程中除了发射药床的初始堆积不同，其余条件均一致，发射药质量均为 150 g。发射药床由两种粒状发射药组成，2 种发射药的形状均为梅花形 19 孔药。两种发射药的化学组分均相同。小药粒的弧厚为 1.49 mm，大药粒的弧厚为 1.69 mm。由于发射药床的初始堆积是随机的，所以相同质量的发射药床的高度也不一致，8 发 150 g 发射药的药床高度分别为 34.27、34.86、34.94、34.51、34.72、35.25、29.15 和 28.16 mm，其中前 6 发是随机堆积的，如图 3(a)所示，第 7、8 发的发射药床均为竖排，如图 3(b)所示。随机堆积的药床高度大于竖排堆积的，说明竖排堆积的发射药床堆积比随机堆积的发射药床均匀、密实。

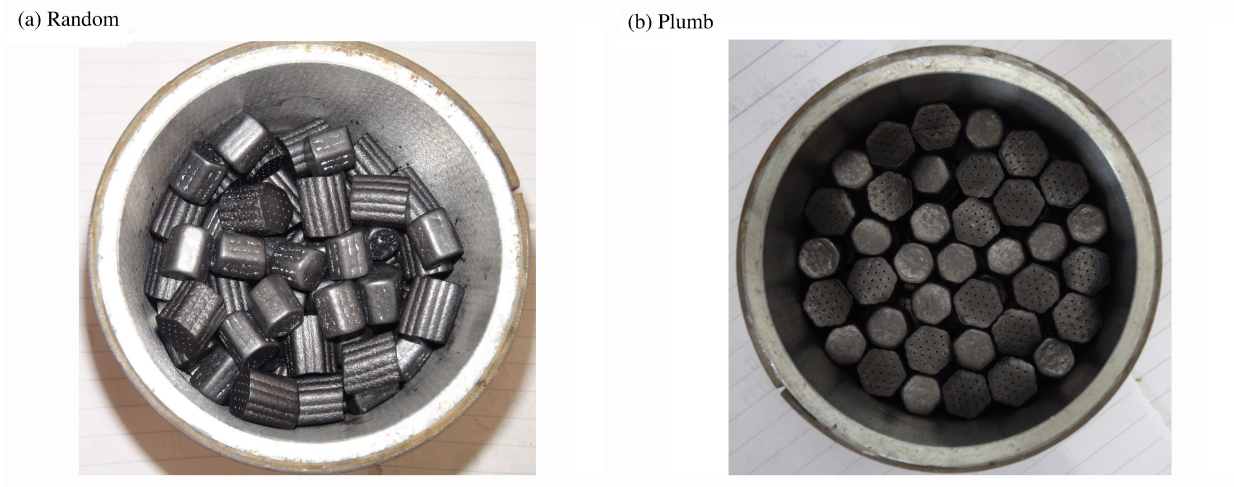

图 3　不同初始堆积的发射药床

Fig. 3　Propellant beds with different packing

表 1 所示为相同的点火药量下，实验测得的燃烧室最大压力和药床底部最大挤压应力。由表 1 可见，随机堆积的药床底部最大挤压应力明显小于竖排堆积的药床底部最大挤压应力。图 4 所示为第 1 发随机堆积药床与第 7 发竖排堆积药床底部挤压应力时间关系曲线。从图 4 的对比分析可以看出，竖排堆积的药床底部挤压应力上升速度快，竖排堆积的药床底部最大挤压应力大于随机堆积。

表 1 不同初始堆积的药床动态挤压破碎实验结果

Table 1 Experimental results of compression stress under different-packed propellant beds

发序	p_{max}/MPa	p_s/MPa
1	30.48	13.16
2	30.15	12.95
3	30.34	14.31
4	30.42	16.74
5	30.21	14.72
6	30.43	14.12
7	30.17	31.12
8	30.18	31.34

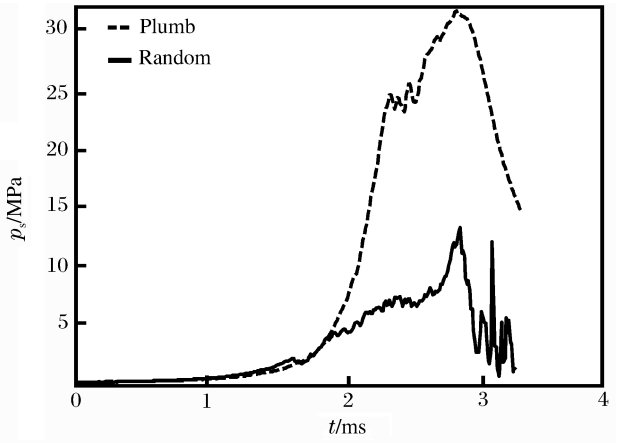

图 4 随机堆积和竖排堆积药床底部挤压应力时间曲线

Fig. 4 Comparison of compression stress at the bottom between different-packed propellant beds

3 挤压应力计算

3.1 挤压破碎实验动力学模型

为了模拟发射药床的挤压破碎动力学过程,建立了发射装药动态挤压破碎装置的力学模型,如图 5 所示,其中 p 为作用于活塞上的燃烧室压力,如图 6 所示。

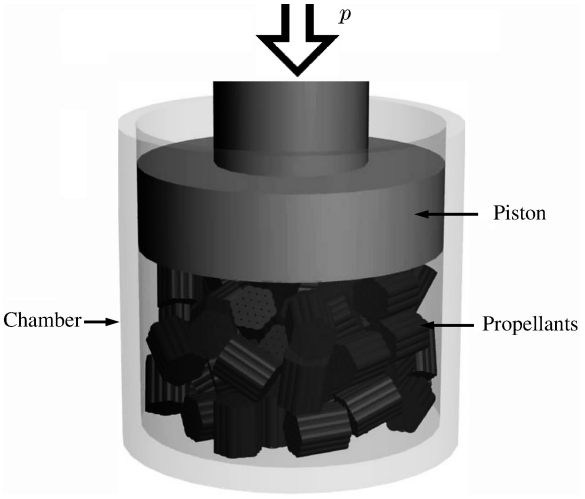

图 5 力学模型

Fig. 5 Mechanics model

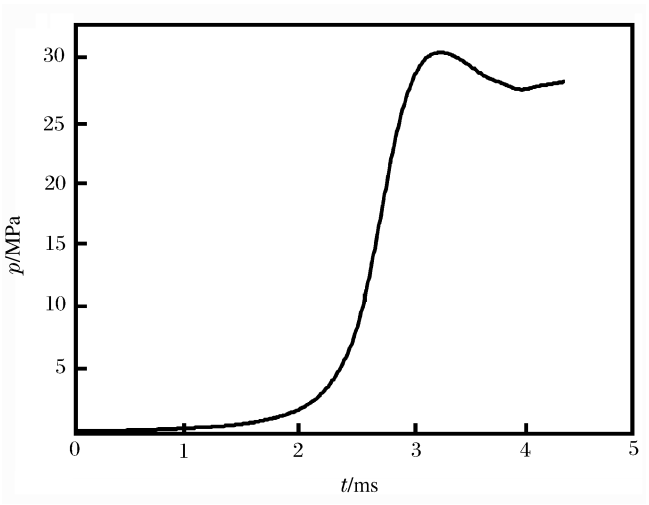

图 6 实测作用于活塞上的燃烧室压力时间曲线

Fig. 6 Histories of the pressure lodaing on burning chamber in experiment

采用离散单元法[5-6],分别对随机堆积的发射药床和竖排堆积的发射药床进行挤压破碎动力学计算。离散单元法是以牛顿第二定律为基础,尤其是在大变形和大范围运动的情况下,便于计算由离散单元组成的系统在准静态和动态条件下的变形过程。对于每个单元,计算出其上的所有作用力,求出合力与合力矩,列出动力学方程,通过差分格式解出每一时步的速度和位移,并对时域积分,就可获得任意单元的速度和位置。

随机堆积[7]和竖排堆积的发射药床的初始构型,如图 7 所示。将发射药床中的每个发射药粒离散成大小相同的刚性球单元系统,任意相邻的 2 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 2 个切向弹簧。发射药粒在活塞冲击作用下的破坏过程通过弹簧的变形与断裂来体现。图 8 所示为相应堆积构型下发射药床的离散模型。



图 7　随机堆积和竖排堆积的发射药床初始构型

Fig. 7　Initial models of different-packed propellant beds

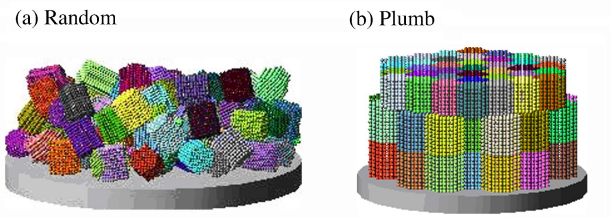

图 8　随机堆积和竖排堆积的发射药床离散模型

Fig. 8　Discrete models of different-packed propellant beds

3.2　离散单元系统的运动方程

任取某个发射药粒中的离散单元 i 为研究对象，建立如图 9 所示的全局坐标系 $OXYZ$，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 xy 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 9 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：

$$m_i \boldsymbol{a}_i = \sum_j \boldsymbol{f}_{ij} + \boldsymbol{f}_i \tag{1}$$

由动量矩定理，单元 i 在局部坐标系 $oxyz$ 中的转动方程为：

$$J_i \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}_i}{\mathrm{d}t} = \sum_j \boldsymbol{M}_{ij} + \boldsymbol{M}_i \tag{2}$$

式中：m_i 为单元 i 的质量，$\boldsymbol{a}_i$ 为单元 i 的质心线加速度，$\boldsymbol{f}_{ij}$ 为单元 i 受到接触单元 j 的接触力，$\boldsymbol{f}_i$ 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，$\boldsymbol{M}_{ij}$ 为单元 i 与单元 j 接触所产生的接触力矩，$\boldsymbol{M}_i$ 为单元 i 所受除接触力矩以外的外力矩。

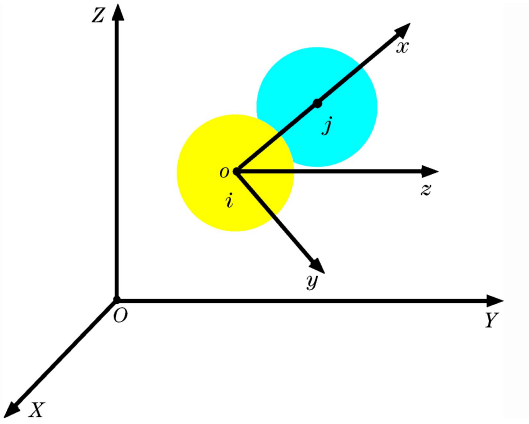

图 9　坐标系及单元接触情况

Fig. 9　Coordinate system and contact status of elements

3.3　球体单元接触模型

当离散单元 i 和 j 接触时，在法线和切线方向上，弹性效应等效于弹簧-阻尼器作用，如图 10 所示。法线、主切线和次切线方向的刚度系数分别为 $k_{ij}^{(\mathrm{n})}$、$k_{ij}^{(\mathrm{s})}$ 和 $k_{ij}^{(\mathrm{b})}$，阻尼系数分别为 $c_{ij}^{(\mathrm{n})}$、$c_{ij}^{(\mathrm{s})}$ 和 $c_{ij}^{(\mathrm{b})}$，具体计算公式参见文献[8]。法向接触力 $\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{n})}$ 为[9]：

$$\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{n})} = -k_{ij}^{(\mathrm{n})} \Delta\delta^{\alpha} \boldsymbol{n}_{ij} - c_{ij}^{(\mathrm{n})} \boldsymbol{v}_{ij}^{(\mathrm{n})} \tag{3}$$

式中：$\Delta\delta = r_i + r_j - r_{ij}$ 为单元间法向相对变形量，r_i 和 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 α 反映了接触的性质，对球体之间的接触，取 $\alpha=3/2$；$\boldsymbol{n}_{ij}$ 为法向单位矢量，方向由 i 指向 j；$\boldsymbol{v}_{ij}^{(\mathrm{n})}$ 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：

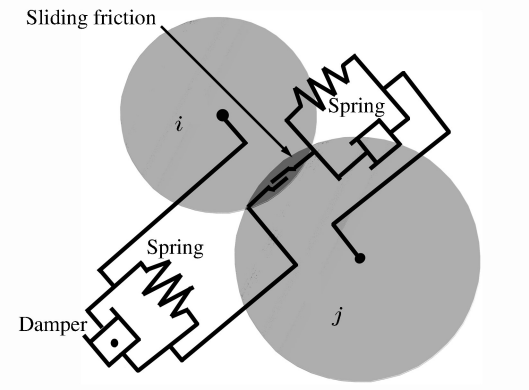

图 10　球体单元接触模型

Fig. 10　Contact model of spherical bodies

$$\boldsymbol{v}_{ij}^{(\mathrm{n})} = [(\boldsymbol{v}_i - \boldsymbol{v}_j - (\boldsymbol{\omega}_i r_i + \boldsymbol{\omega}_j r_j) \times \boldsymbol{n}_{ij}) \cdot \boldsymbol{n}_{ij}]\boldsymbol{n}_{ij} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{v}_i$、$\boldsymbol{v}_j$ 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:

$$\begin{cases} \boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{s})}(t)=\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{s})}(t-\Delta t)-k_{ij}^{(\mathrm{s})}\boldsymbol{v}_{ij}^{(\mathrm{s})}\Delta t-c_{ij}^{(\mathrm{s})}\boldsymbol{v}_{ij}^{(\mathrm{s})} \\ \boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{b})}(t)=\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{b})}(t-\Delta t)-k_{ij}^{(\mathrm{b})}\boldsymbol{v}_{ij}^{(\mathrm{b})}\Delta t-c_{ij}^{(\mathrm{b})}\boldsymbol{v}_{ij}^{(\mathrm{b})} \end{cases} \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{s})}$、$\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{b})}$ 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;$\boldsymbol{v}_{ij}^{(\mathrm{s})}$、$\boldsymbol{v}_{ij}^{(\mathrm{b})}$ 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,此时切向的滑动摩擦力在主、次切线方向上的分量分别为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{f}'^{(\mathrm{s})}_{ij}=\mu\left|\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{n})}\right|\dfrac{\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{s})}}{\sqrt{\left|\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{s})}\right|^2+\left|\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{s})}\right|^2}} \\ \boldsymbol{f}'^{(\mathrm{b})}_{ij}=\mu\left|\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{n})}\right|\dfrac{\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{b})}}{\sqrt{\left|\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{s})}\right|^2+\left|\boldsymbol{f}_{ij}^{(\mathrm{b})}\right|^2}} \end{cases} \tag{6}$$

式中:μ 为单元间滑动摩擦系数。

需要强调的是,当离散单元之间没有相互接触时,为了计算方便,离散单元被视为刚体,当离散单元之间相互接触时,离散单元被视为弹性体,通过单元间法向相对变形量来计算法向的接触力,同时切向接触力体现了对离散球体单元转动的影响。由于每颗发射药粒被离散成大量的球体单元,所以发射药粒之间的接触力计算转化为离散球体单元之间的接触力计算。

3.4 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、压缩或剪切力超过等效弹簧的拉力极限 F_{s}、压力极限 F_{c} 或粘着力极限 F_{v} 时,弹簧断裂。弹簧的拉力极限、压力极限和黏着力极限可以根据目黑等[10]提出的与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 有关的破坏参数获得:

$$\begin{cases} F_{\mathrm{s}}=[0.874\,3-0.029\,87\lg\dot{\varepsilon}+0.043\,79\,(\lg\dot{\varepsilon})^2]\sigma_{\mathrm{s}}r \\ F_{\mathrm{c}}=[1.021-0.050\,76\lg\dot{\varepsilon}+0.025\,83\,(\lg\dot{\varepsilon})^2]\sigma_{\mathrm{c}}r \\ F_{\mathrm{v}}=\sigma_{\mathrm{v}}\sqrt{\dfrac{F_{\mathrm{s}}}{\sigma_{\mathrm{s}}r}\dfrac{F_{\mathrm{c}}}{\sigma_{\mathrm{c}}r}} \end{cases} \tag{7}$$

式中:r 为球体单元的半径,σ_{s}、σ_{c}、σ_{v} 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,可以通过实验获得。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。

3.5 算 例

发射药床的质量、药床颗粒个数及几何模型与实际实验过程中的参数一致,计算参数如表 2 所示。图 11~12 所示为数值计算出的不同初始堆积条件下药床底部挤压应力曲线。

表 2 计算参数

Table 2 Simulation parameters

$\rho/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	r/mm	E/GPa	ν	F_{s}/kN	F_{c}/kN	F_{v}/kN	μ	$\Delta t/\mu$s	t/ms
1.65×10^3	0.15	1.0	0.26	1.2	3.6	1.5	0.1	1	3.5

由图 11 中可知道,图 6 中所示的燃烧室压力作用下,实验测试获得的发射药床底部最大挤压应力为 12.95 MPa,而在同样的燃烧室压力条件下,计算获得的随机堆积发射药床底部的最大挤压应力为 11.51 MPa,其数值比测试结果偏小。同样,从图 12 中可以看出,计算获得的竖排堆积发射药床底部的底部最大挤压应力为 31.04 MPa,而实验测得的竖排堆积发射药床的底部最大挤压应力为 31.34 MPa,计算曲线与测试曲线的上升趋势比较吻合。计算结果与实验结果之间的误差主要由以下 2 个方面造成:首先计算中的发射药床初始堆积是随机的,其与实验过程中的随机堆积发射药床的初始构型存在着

差异，这是造成计算与实验结果之间误差的最主要因素。另外，计算参数的选取、离散单元半径的选取、弹簧的断裂准则等都会对计算结果产生一定的影响。

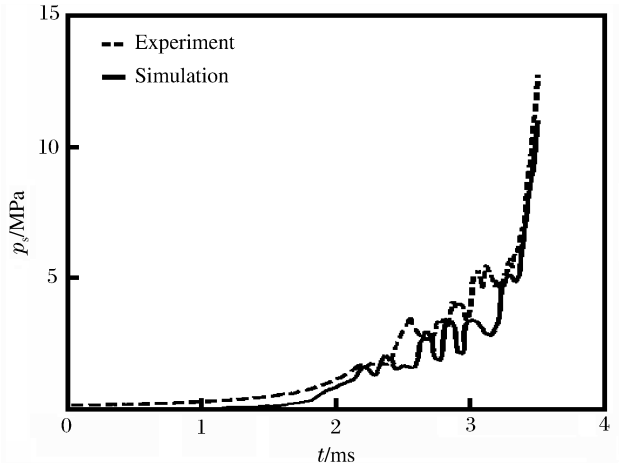

图 11 随机堆积药床底部挤压应力时间曲线

Fig. 11 Comparison of compression stress at the bottom with random-packed propellant beds between simulation and experiment

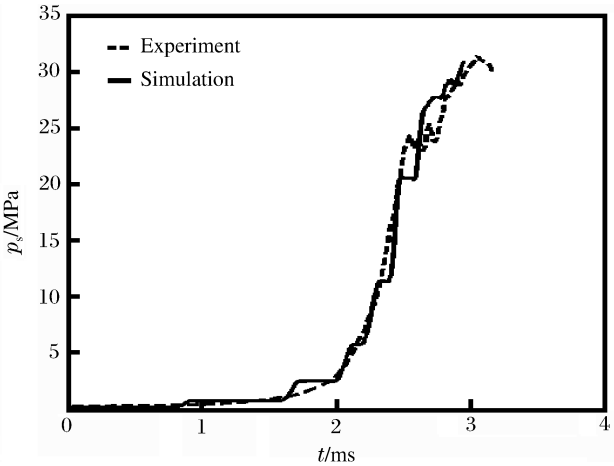

图 12 竖排堆积药床底部挤压应力时间曲线

Fig. 12 Comparison of compression stress at the bottom with plumb-packed propellant beds between simulation and experiment

4 结　论

发射药床底部挤压应力是评估发射装药发射安全性的关键数据。通过发射装药动态挤压破碎实验和计算，获得了随机堆积和竖排堆积两种不同初始堆积的药床底部挤压应力。实验和计算结果吻合较好，表明发射药床的初始堆积对药床底部挤压应力有较大影响，可为进一步研究发射药床的破碎规律提供重要的理论基础和计算手段。

参考文献：

[1] 芮筱亭，贠来峰，王国平，等. 弹药发射安全性导论[M]. 北京：国防工业出版社，2009.

[2] Horst A W, May I W, Clarke E V. The missing link between pressure waves and breechblows[R]. AD-A058 354/2GA, 1978.

[3] Keller G E, Horst A W. Effects of propellant grain fracture on the interior ballistic of guns[R]. AD-A209 007/4/GAR, 1989.

[4] 陈涛，芮筱亭，凌剑，等. 发射药床动态挤压破碎模拟研究[J]. 南京理工大学学报，2006，30(4)：467-471.
Chen Tao, Rui Xiao-ting, Ling Jian, et al. Dynamic extrusion and fracture simulation of propellant charge bed[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(4): 467-471.

[5] 姜世平. 散体系统破碎动力学研究[D]. 南京理工大学，2011.

[6] Jiang Shi-ping, Rui Xiao-ting, Hong Jun, et al. Numerical simulation of impact breakage of gun propellant charge [J]. Granular Matter, 2011, 13(5): 611-622.

[7] 姜世平，芮筱亭，洪俊，等. 发射药床自然堆积模拟[J]. 弹道学报，2011，23(2)：82-86.
Jiang Shi-ping, Rui Xiao-ting, Hong Jun, et al. Simulation on packing structure of propellant bed[J]. Journal of Ballistics, 2011, 23(2): 82-86.

[8] Mishra B K, Murty C V R. On the determination of contact parameters for realistic DEM simulation of ball mills [J]. Powder Technology, 2001, 115(3): 290-297.

[9] Emden H K, Wirtz S, Scherer V. Applicable contact model for the discrete element method: The single particle perspective[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2008, 131(2): 024001.

[10] 目黑公郎，博野元彦. 用粒状体模拟混凝土结构的破坏分析[J]. 东京大学地质研究所汇报，1991，63(4)：409-468.

Mekuro K, Hakano T. Fracture analysis of concrete structures by granule simulation[J]. Research Report of Geology Institute of Tokyo University, 1991,4(63):409-468.

Effect of original packing on compression stress at the bottom of propellant bed*

Wang Yan[1], Rui Xiao-ting[1], Song Zhen-dong[2], Li Chao[1],
Jiang Shi-ping[1], Feng Bin-bin, Wang Guo-ping[1]
(1. *Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Bureau of Ordnance, General Equipment Support Department of General Equipment Headquaters, Beijing* 100720, *China*)

Abstract: To provide the key data for evaluating the launch safety of propellant charge, dynamic compression fracture experiments were carried out for the propellant charges with different original packing modes. And the corresponding compression stresses at the bottoms of the propellant beds were obtained under the same loadings. By using the discrete element method, a dynamics model was proposed to simulate the compression fracture of the propellant charges. And the simulated compression stresses were in agreement with the experimental ones. The random packing mode did not obviously affect the compression stresses at the bottoms of the propellant beds, but when the propellants were packed in the plumb mode, the compression stresses at the bottoms of the propellant beds were markedly different.

Key words: mechanics of explosion; compression stress; dynamics compression; propellant bed; original packing

* Received 1 April 2013; Revised 27 May 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11102089)
Corresponding author: Rui Xiao-ting, ruixt@163.net

(责任编辑 王易难)