文章编号：1003-1480（2022）05-0060-06

发射药动态力学强度实验及评价方法研究进展

周 敬，白 微，李 达，赵宝明，周 震

（西安近代化学研究所，陕西 西安，710065）

摘 要：为深入研究火炮发射安全性的本质问题，本文归纳分析了近年来发射药动态力学强度的研究进展，介绍了落锤撞击实验法、发射药床撞击实验法、发射药动态挤压模拟实验法以及数值仿真等在发射药动态力学强度研究中的应用情况，综述了现有的动态力学强度评价方法，并为今后发射药动态力学强度的研究方向提出建议。

关键词：发射药；力学强度；评价方法；发射安全性

中图分类号：TJ55；TQ562 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2022.05.013

Research Progress on Dynamical Mechanical Strength Experiment and Evaluation Methods of Gun Propellants

ZHOU Jing，BAI Wei，LI Da，ZHAO Bao-ming，ZHOU Zhen

（Xi'an Modern Chemistry Research Institute，Xi'an，710065）

Abstract：In order to study the essence problem of launch safety for gun, the research progress on dynamical mechanical strength of gun propellants were summarized and analyzed. Application status of dropping hammer impact test, gun propellant bed impact test, dynamic compression simulation test and numerical simulation in study of dynamical mechanical strength of gun propellants were introduced, the evaluation methods of the dynamical mechanical strength of gun propellants were reviewed, and suggestions for the further study of dynamical mechanical strength were given.

Key words：Gun propellant；Mechanical strength；Evaluation methods；Launch safety

新时期军事需求背景下，大口径榴弹火炮和坦克炮等身管武器应具有更远的射程、快速发射能力以及高杀伤威力[1]。提高发射药在火炮膛内的装填密度和使用高能发射药是提高火炮威力的有效途径。然而，这两种途径均为火炮发射安全性带来了隐患。这是因为一方面随着装填密度的增大，药室自由空间变小，装药床透气性降低，点传火通道变窄甚至不畅，致使装药点传火条件恶化，产生膛内压力波[2]，使得发射装药系统的稳定性、安全性变差[3]。另一方面，由于高能发射药[4]配方中一般都加入 RDX 等高能固体填料，导致发射药力学性能降低，特别是在低温环境下，高能发射药的冷脆特性使其在火炮膛内易受到压力波动而破碎，导致燃面增加，改变药床的燃气生成规律，严重时导致膛压剧增而发生膛炸等安全事故[5]。因此，开展模拟火炮膛内受力情况下高能发射药的动态力学强度研究，是当前新型高能发射药配方设计和身管武器使用安全性研究的重要方向。本文对国内外发射药的动态力学强度实验及评价方法等进行综述，并对今后的研究提出了展望。

1 发射药动态力学强度实验方法

1.1 落锤撞击实验法

落锤撞击实验法是一种操作简单、应用广泛的发

收稿日期：2022-02-10

作者简介：周敬（1988-），女，硕士，从事发射药性能检测研究。

通讯作者：赵宝明（1978-），男，副研究员，从事发射药性能测试与装药点传火研究。

射药动态力学强度研究方法。芮久后等[6]采用落锤冲击实验法研究了粘结工艺条件变化对火药界面粘结强度的影响，并制备出了界面粘结强度良好的包覆火药。邢浴仁[7]用落锤实验方法研究了粒状发射药抗冲强度，总结出粒状发射药抗冲强度与落锤质量及高度的关系。Gazanas 等[8-10]采用落锤和高速液压伺服装置研究了 M30、JA2 发射装药的压缩和撞击力学性能，研究了不同温度下，应变率和应变量对破碎特性的影响，并用密闭爆发器测量破碎药粒的燃烧规律。

周敬等[11-12]对传统的落锤撞击装置进行改进，装置结构见图 1。

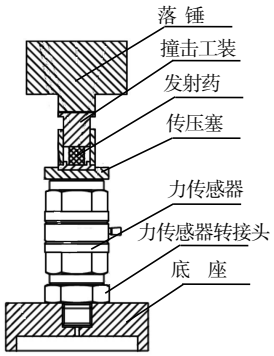


图 1　发射药落锤撞击实验原理简图

Fig.1　Experimental schematic of dropping hammer impact test of propellants

如图 1 所示，落锤以一定的动态撞击能作用于安装发射药粒的工装上，并传递给发射药粒，工装底部的力传感器可检测撞击瞬间药粒受到的轴向力值变化过程（F——t）曲线，结合样品撞击后的响应情况，提出了定量表征发射药动态力学性能的特征参量，即药粒发生临界损伤时的临界撞击能和极限抗冲应力。并研究了发射药受力方向、撞击能以及温度等对高能发射药动态力学强度的影响。刘计划等[13-14]提出了一种表征发射药初始冲击破坏点冲击韧性的方法。该方法通过高速摄像机记录落锤冲击发射药的过程，确定初始破坏时刻。利用数字图像相关方法（DIC）计算其表面变形[15]，求得轴向名义应变能密度。用轴向名义应变能密度法，确定发射药落锤冲击试验的初始破坏点。根据屈服点与初始破坏点决定塑性变形的应力应变数据，得到发射药试样在整个塑性段的应变能密度，经过分析得到发射药冲击韧性的表征参数。

1.2　气体炮冲击实验法

Lieb 等[16]用气体炮冲击实验装置加速已保温的药粒并撞击目标，将收集的药粒和碎片进行密闭爆发器实验，得出等效燃烧表面积曲线，并计算破碎引起的燃烧表面积增加量，来表征发射药的动态力学性能。周彦煌等[17]用 100mm 空气炮对恒温处理过的炮用发射药进行动态破碎实验，对不同撞击速度下发射药的破碎程度及破碎药粒的燃烧规律进行了研究[18]。

1.3　发射药床撞击实验法

邹瑞荣等[19]利用脉冲 X 光实验，获得膛内药床在底部点火条件下撞击弹底及在弹底处形成堆积与挤压状况的照片，并测出了药床前沿药粒撞击弹底时的运动速度。借助动态模拟实验，取得了与膛内实际环境相近的药粒撞击和挤压实验结果，为进一步研究火药由破碎诱发膛炸提供了理论依据和技术措施。

黄金等[20]通过发射药床撞击与挤压装置来检测发射药的动态力学强度，见图 2。采用高低压发射原理推动装填被试发射药的运载器，通过控制运载器的速度对发射药床施加相应的撞击和挤压作用，以检测发射药床的动态力学强度。结合密闭爆发器燃烧实验，研究分析撞击前后的初始动态活度比，提出了发射药破碎度的定量评价参数，并选择典型发射药样品进行了检测评价。

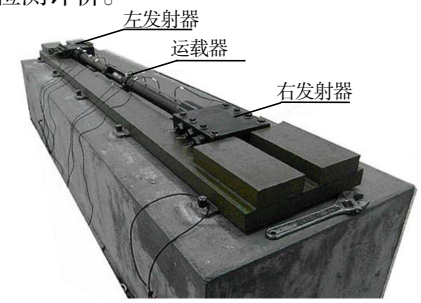


图 2　发射药床撞击与挤压装置

Fig.2　Dynamic impact and compression device of propellant bed

肖春云等[21-22]设计了一个发射药床强度模拟实验平台，以模拟火炮膛内高温、高压发射环境。通过发射装置对装有发射药的药筒加速，加速到预定速度后被回收装置接收。通过观察撞击后发射药的状态，检验发射药强度，为火炮发射时的安全性提供指导。

1.4　发射药动态挤压模拟实验研究

发射药动态挤压模拟实验通过模拟弹底药床被点燃前发射药的挤压破碎情况，获得挤压破碎过程中药床所受力学环境，再现火炮射击过程中膛内发射药

床的挤压破碎过程[23]。

陈涛等[24]建立了用于发射药床动态挤压破碎应力研究的半密闭爆发器控制方程组，进行了半密闭爆发器数值与物理仿真。结果表明，调整半密闭爆发器的装填参数可改变半密闭爆发器内压力变化规律。

冯宾宾等[25]用发射药动态挤压破碎装置对不同温度下某硝胺发射药进行实验，通过密闭爆发器燃烧实验，计算破碎发射装药的破碎程度，建立了装药破碎程度与最大挤压应力之间的定量关系。芮筱亭等对发射药动态力学强度持续进行了系统的理论、计算、试验研究，文献[26]给出了发射装药膛内力学环境试验方法、发射装药动态挤压破碎试验方法、发射装药起始动态活度比试验方法等，并成功用于工程实践，为科学评估发射装药发射安全性提供了系统的理论依据、技术手段和技术标准。

1.5 数值仿真研究

对于发射药动态力学强度的研究，除上述几种以实验为基础的方法外，芮筱亭团队[27]在国内首次提出了用数值仿真方法来研究发射药的挤压破碎力学机理。用有限元软件分别对药粒在静载及冲击载荷作用下的力学行为及破碎规律进行了数值仿真，建立了不同承载方式下破碎块度与载荷幅度间的关系式。

孔斌等[28]用 ANSYS 仿真软件对单孔管状发射药颗粒的冲击力学性能进行模拟仿真，结果表明冲击过程中在药柱的冲击边缘处最先出现应力集中，应力由点、线、面、体向药柱中进行传递。整个冲击过程中应变主要集中在药柱的中部，宏观上表现为药柱中部膨胀。在冲击作用下单孔管状发射药的断裂形式表现为接触式断裂。

韩屹湛等[29]分别采用有限元分析软件、动态分析软件对多孔发射药颗粒的准静态压缩过程、动态冲击加载过程进行数值仿真。仿真结果表明：发射药颗粒在准静态压缩过程中药粒整体呈现体积破裂模式，而高应变率加载动态冲击条件下呈现接触破裂模式。

洪俊等[30-31]采用一种建立在非连续介质基础上的离散单元法为工具，将密实构型下的发射药粒离散成弹簧-球单元系统，如图 3 所示，并将散粒体系统动力学仿真方法应用到发射药床挤压破碎的数值仿真中。在弹簧-球模型中，弹性系数的确定较大程度上依赖于实验值和经验值。而用 EDEM 软件[32]以及 Hertz-Mindlin 黏结接触破碎模型[33]计算颗粒破碎时，其接触模型参数由材料物性给定(如密度、弹性模量、泊松比等)。张瑞华等[34]运用 EDEM 软件对低温下硝胺发射装药挤压破碎和破碎发射装药密闭爆发器进行模拟，并用实验验证数值模拟系统的有效性及合理性，为高能发射装药冲击破碎过程和发射装药发射安全性研究奠定了基础。

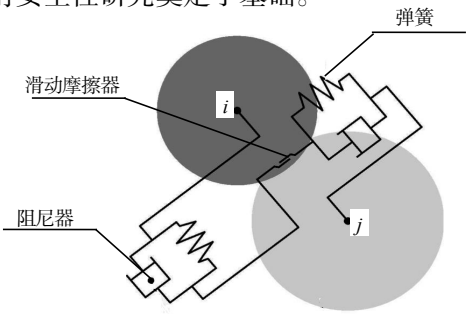


图 3 球体单元的接触模型

Fig.3 Contact model of spherical bodies

2 发射药动态力学强度评价方法研究

发射药动态力学强度评价方法可以定量评价发射药的动态力学性能。

2.1 破碎度法

发射药破碎度[35]定义为破碎后发射药的总燃面与其标准发射药总燃面之比，表达式为：

$$B_r=\frac{S_{br}}{S_{st}}=\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i\frac{M_0}{M_i}\frac{S_i}{S_0} \qquad (1)$$

式（1）中：B_r为发射药破碎度；S_{st}、S_{br}分别为标准发射药和破碎发射药的总燃面；ε_i为每个破碎等级占总质量的百分数；M_0、S_0分别为标准发射药的单颗质量和初始燃面；M_i、S_i为第 i 个破碎等级中单粒碎药的质量和燃面；n 为按照破碎粒度大小对破碎发射药的分级数。该方法操作繁琐，计算误差大。发射药在火炮膛内的受力环境复杂，即使在同样的加载条件下，破碎后的增燃面积也只能是满足统计分布，所以很难通过增燃面积考察发射药的破碎机制[36]。

2.2 初始动态活度比法

经撞击、挤压作用破碎后的发射药形状各异，难以

直接测量或计算破碎发射药的初始燃面，评价发射药的破碎程度，王燕等[37]提出用起始动态活度比表征发射装药的破碎程度。

根据发射装药在密闭爆发器内燃气状态方程、几何燃烧定律等，破碎与破碎前发射药的动态活度比 R 为：

$$R=\frac{L'}{L_0}=\frac{\dfrac{\beta'^2\rho u_1}{\beta_m'\omega}P'^{n-1}S'}{\dfrac{\beta_0^2\rho u_1}{\beta_{om}\omega}P_0^{n-1}S_0}\approx\frac{S'}{S_0} \qquad (2)$$

式（2）中：带上标“′”表示破碎发射药参数，带下标“0”的符号为破碎前发射药的参数；L 为动态活度；u_1 为发射药燃速系数；S 为正在燃烧发射药的表面积；β 是压力 P 的一个函数；β_m 表示最大压力条件下的 β 值；ω 为发射药质量；ρ 为发射药密度；P 为密闭爆发器实验压力；n 为发射药的燃速压力指数。

由于动态活度比曲线的起始阶段振荡剧烈，通过对压力曲线进行一定的处理后，才能获得破碎发射装药的起始动态活度比。在动态活度比曲线上以步长 0.1 取区间[0.2，0.8]上的多个数据点，用最小二乘法拟合一条直线，该直线与纵坐标轴的截距为破碎发射装药相对于未破碎发射装药的起始动态活度比 R_0，用来描述发射药的破碎程度。

2.3　临界撞击能法

临界撞击能[38]指在临界损伤落高（该高度下 50%药粒无响应，其余 50%的发射药粒出现裂纹或裂开）下，发射药单位面积上受到的撞击能，表达式见公式（3）：

$$E_R=\frac{mgH_R}{S} \qquad (3)$$

式（3）中：E_R 为单位面积上的临界撞击能；m 为落锤质量；g 为当地重力加速度；H_R 为临界损伤落高；S 为样品端面面积。

要确定发射药的临界撞击能，必须先确定临界损伤落高 H_R，在 H_R 上下各选择 5 个不同落高，对应每个落高 H_i，实验一组样品（逐个撞击每个药粒，记录药粒响应情况和 F——t 曲线），得到该落高下药粒无响应的百分数 y_i，全部落高实验完成之后，得到一组数据（H_i，y_i），利用一元线性回归分析的方法[7]，求出 y 和 H 的回归方程，将 y=50 代入方程，求出临界损伤落高 H_R 及临界撞击能 E_R，来表征发射药的动态力学强度。

2.4　极限抗冲应力法

极限抗冲应力[8]是指发射药发生临界损伤，药粒无响应时单位面积受到的最大应力，表达式见公式（4），该值同样可表征发射药的动态力学强度。

$$\sigma_m=\frac{F_m}{S} \qquad (4)$$

式（4）中：σ_m 为样品承受的极限应力；F_m 为临界点处样品能承受的最大力值。

图 4 为 3 种典型发射药在临界损伤撞击能处，药粒无响应时对应的 F——t 曲线。

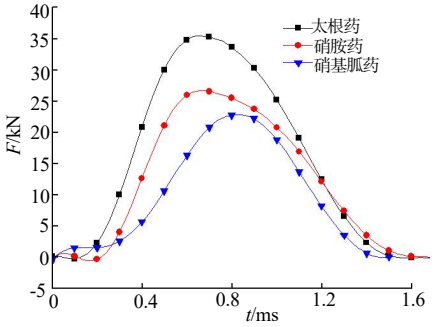


图 4　3 种典型发射药临界撞击能处的 F——t 曲线

Fig.4　F——t curves of three kinds of propellants at the state of critical impact energy

由图 4 可知，3 种发射药最大力值 F_m 差别明显，但脉宽值相差不大。故可以采用临界撞击能下，药粒无响应时的 F_m 值来表征发射药的动态力学强度。另外，考虑到实际应用过程中发射药的横截面积不尽相同，则采用药粒无响应时单位面积上的最大力值，即极限抗冲应力来表征发射药动态力学强度。

2.5　冲击韧性法

刘计划等[14]利用轴向名义应变能密度法，确定发射药落锤冲击试验中的初始破坏点。根据屈服点与初始破坏点决定塑性变形的应力应变数据，得到发射药试样在整个塑性段的应变能密度，经过分析得到发射药冲击韧性的表征参数。

假设在落锤冲击过程中的一个微小时间段 Δt 内，能够产生塑性变形的有效载荷的改变量为 ΔF，轴向的尺寸改变量为 ΔL，则此时间段内的平均塑性应力为 $\Delta F/S_0$，S_0 为初始横截面；塑性应变为 $\Delta L/L_0$，L_0 为初始轴向尺寸或标距。在 Δt 内的塑性应变能密度为 $\Delta F/S_0$ 与 $\Delta L/L_0$ 的乘积，即 $\Delta F\Delta L/S_0L_0$，单位为 J·cm^{-3}。$\Delta F\Delta L$ 为在 Δt 内产生的变形能，单位为 J；S_0L_0 为体积，单位为 cm^3。因此可通过公式（5）得到单位为 J·cm^{-2} 且能

表征冲击韧性的参量：

$$a_k=W_P \cdot L_0 \qquad (5)$$

式（5）中：W_p为塑性段的应变能密度；α_k为冲击韧性，表示试样每平方厘米作用面上所能承受的塑性变形功和断裂功；L_0为发射药轴向标距。

2.6 燃气生成速率比

陈言坤等[39]引入燃气生成速率比的概念，即破碎后与破碎前发射药燃气生成速率的比值，来定量表征发射药的破碎程度。

在相同质量、相同组分装药、相同燃烧压力条件下，$\omega=\omega'$，$\rho=\rho'$，$\mathrm{d}e/\mathrm{d}t=\mathrm{d}e'/\mathrm{d}t$。结合几何燃烧定律，破碎发射药与未破碎发射药的燃气生成速率比R_F可表示为：

$$R_F=\frac{\dfrac{\mathrm{d}\psi'}{\mathrm{d}t}}{\dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}}=\frac{\dfrac{\rho' S\mathrm{d}e'}{\omega'\mathrm{d}t}}{\dfrac{\rho S\mathrm{d}e}{\omega\mathrm{d}t}}=\frac{S'}{S} \qquad (6)$$

式（6）中：$\mathrm{d}\psi/\mathrm{d}t$、$S$、$\mathrm{d}e/\mathrm{d}t$、$\rho$和$\omega$分别表示未破碎发射药的燃气生成速率、燃烧瞬间的表面积、线燃烧速度、发射药密度和装药量；$\mathrm{d}\psi'/\mathrm{d}t$、$S'$、$\mathrm{d}e'/\mathrm{d}t$、$\rho'$和$\omega'$分别表示破碎发射药的燃气生成速率、燃烧瞬间的表面积、线燃烧速度、发射药密度和装药量。

根据式（6）可知，R_F可以描述为在相同燃烧压力和相同燃去百分比条件下破碎发射药与标准发射药的瞬时燃烧表面积之比，故R_F可用来评价发射药的破碎程度。

通过密闭爆发器实验分别测得标准发射药和破碎发射药的压力——时间曲线，处理计算实验测得的各点压力对应的发射药燃去百分比ψ，进而可得到（$\mathrm{d}\psi/\mathrm{d}t$）——$B$曲线。取同一$B$相应的$\mathrm{d}\psi'/\mathrm{d}t$和$\mathrm{d}\psi/\mathrm{d}t$，根据式（6）计算燃气生成速率比$R_F$。由于发射药燃烧前期的燃烧特性对最大膛压的影响最为显著，因此，对发射药破碎程度的定量描述主要依据破碎发射药燃烧前期的燃烧特性。故用B在区间[0.05，0.25]上，步长为0.05对应的燃气生成速率比平均值来定量描述发射药的破碎程度，其表达式为：

$$\overline{R_F}=\frac{1}{5}\sum R_{FB=i}(i=0.05,0.10,0.15,0.20,0.25) \qquad (7)$$

由式（6）~（7）可知：$\overline{R_F}$物理意义为破碎发射药与未破碎发射药在燃烧前期的燃烧表面积之比。

3 结论与展望

发射药在膛内的受力环境复杂，很难直接检测其受力情况，虽然近年来众多科研工作者采用膛外模拟方法来研究发射药动态力学强度，但还有相当工作要做，展望未来发射药动态力学强度的研究方向主要有：（1）开发能够测得发射过程中膛内发射装药力学环境的检测技术；（2）模拟发射药在真实火炮膛内的受力情况，获得相应力学环境下的破碎发射药。建立发射环境下弹底发射装药最大挤压应力历程与破碎程度之间的定量关系，形成发射装药发射安全性判据和评定方法；（3）系统开展不同温度下发射药动态力学性能研究，探索不同温度尤其是低温条件下发射药的破碎规律及损伤特性；（4）建立实用、有效、准确、可操作性强的高能发射药动态力学性能的检测技术与评价方法，以筛选高能发射药配方、工艺，研究高能发射药的动态力学增强机理，促进新一代高能高强发射药配方的开发及应用。

参考文献：

[1] 王泽山.火炸药科学技术[M].北京:北京理工大学出版社,2002.

[2] 金志明,袁亚雄,宋明.现代内弹道学[M].北京:北京理工大学出版社,1992.

[3] 芮筱亭,贠来峰,沙南生,等.发射装药发射安全性评定技术的研究进展[J].兵工学报, 2005,26(5): 690-696.

[4] 郜涛.高能高强度发射药的研究[D].南京:南京理工大学, 2005.

[5] 叶敏.火炮膛内药床撞击与挤压的实验研究[D].南京:南京理工大学,2010.

[6] 芮久后,王泽山.端面粘贴包覆火药界面粘结强度研究[J] .火炸药学报,2002, 25(1): 1-3.

[7] 邢浴仁.粒状发射药抗冲强度落锤实验方法[J].火炸药学报,1994,6(2):12-22.

[8] Gazanas G A, Ford J C. Uniaxial compression testing of M30 and JA2 gun propellant using a statistical design strategy[J]. Experimental Mechanics, 1992, 32(2): 154-162.

[9] Gazanas G A, Juhasz A, Ford J C. Strain rate insensitivity of damage-induced surface area in M30 and JA2 gun propellant

[R]. AD-A238666 /1 /GAR, 1991.

[10] Gazonas G A. A uniaxial nonlinear thermoviscoe-lastic constitutive model with damage for M30 gun propellant[R]. AD-A283 626, 1994.

[11] 周敬,杨丽侠,陈晓明,等.发射药落锤撞击实验及评价方法探讨[J].爆破器材, 2014,43(2):15-19.

[12] 周敬,杨丽侠,张邹邹,等.高能发射药动态力学强度的影响因素研究[J]. 爆破器材,2016,45(2):29-33.

[13] 刘计划,赵宏立,何昌辉,等.冲击载荷作用下典型发射药的弹性模量分析方法[J].兵工学报,2021,42(2):289-296.

[14] Liu J H, Zhao H L, He C H, et al. Method to determine the impact strength of triple-base gun propellant based on strain energy density[J].Propellants,Explosives,Pyrotechnics,2020 (45): 1-10.

[15] Pan B, Qian K, Xie H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J].Measurement Science and Technology,2009(20): 062 001.

[16] Lieb R J, Rocchio J J. Gas gun impact tester for solid gun propellants[R]. ADA149712, 1984.

[17] 周彦煌,张明安,刘千里.炮用发射药动态破碎实验方法及破碎现象的观察[J].弹道学报, 1990(1):59-66.

[18] 张明安,周彦煌,刘千里.炮用发射药破碎药粒燃烧规律测定[J].弹道学报,1990(3):62-70.

[19] 邹瑞荣,袁亚雄,翁春生.膛内火药床撞击与挤压的动态模拟实验[J].弹道学报, 1998,10(3): 66-69.

[20] 黄金.发射药动态力学性能检测技术及评价方法研究[D].南京:南京理工大学,2012.

[21] 肖春云,徐万和.发射药强度模拟实验方法[J].四川兵工学报,2011,32(8):31-33.

[22] 肖春云.发射药床撞击与挤压试验系统工作机理分析[D].南京:南京理工大学,2012.

[23] 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): 468-471.

[24] 陈涛,芮筱亭,洪俊,等.用于药床动态挤压应力研究的半密闭爆发器仿真[J].系统仿真学报,2007,19(17):4 075-4 078.

[25] 冯宾宾,芮筱亭,徐浩,等.发射过程中某硝胺发射装药的动态挤压破碎情况[J].火炸药学报,2012,35(2): 70-73.

[26] 芮筱亭,冯宾宾,王燕,等.发射装药发射安全性评定方法研究[J].兵工学报,2015,36(1):1-10.

[27] 芮筱亭,刘军,陈涛,等.发射药挤压破碎动力学分析[J].兵工学报,2004,25(6):679-683.

[28] 孔斌,代淑兰,王亚微,等.管状发射药冲击力学性能数值仿真[J].兵器装备工程学报,2019,40(5): 210-213.

[29] 韩屹湛.多孔发射药力学特性实验研究与数值仿真[D].南京:南京理工大学,2016.

[30] 洪俊,芮筱亭.发射药粒冲击破碎动力学仿真[J].弹道学报,2010,22(1):61-64.

[31] 洪俊,芮筱亭,费庆国.发射药床挤压破碎动力学仿真[J].系统仿真学报,2010,22(4): 419-425.

[32] EDEM tutorial[M] . Edinburgh:DEM Solutions,2011.

[33] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1 329-1 364.

[34] 张瑞华,芮筱亭,赵宏立,等.基于离散单元法的发射装药挤压破碎模拟实验[J].爆炸与冲击,2021,41(6):12-20.

[35] 金志明,翁春生.火炮装药设计安全学[M].北京:国防工业出版社, 2001.

[36] 吴长水,张小兵,袁亚雄.分形理论在火药破碎研究中的应用展望[J].火炸药学报,2005,28(3): 20-22.

[37] 王燕,芮筱亭,冯宾宾,等.发射装药破碎程度表征方法研究[J].含能材料,2015,23(1):57-61.

[38] 赵毅.高能发射药的力学性能及刚性模块装药研究[D] .南京:南京理工大学,2004.

[39] 陈言坤,马士洲,汪海涛,等.基于燃气生成速率比的发射药破碎程度定量表征方法[J].爆破器材,2019,48(2):15-19.