

# 小口径榴弹自然破片形成过程的数值模拟\*

蒋建伟, 张 谋, 门建兵

(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:**采用 AUTODYN 软件中基于 Mott 分布生成自然破片的 Stochastic 材料破坏模型, 对 30mm 小口径榴弹壳体膨胀和自然破碎过程进行了数值模拟, 获得了破片初速、飞散角沿轴向曲线分布及破片质量分布, 仿真结果与破碎性试验回收破片的统计结果吻合较好。

**关键词:**榴弹; 自然破片; 数值模拟; 破坏模型

**中图分类号:** TJ012.4 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation of the Formation of Natural Fragments from a Small Caliber Shell

JIANG Jianwei, ZHANG Mou, MEN Jianbing

(State Key Laboratory of Science and Technology of Explosion, BIT, Beijing 100081, China)

**Abstract:** This paper introduces the formation of natural fragments use Stochastic failure models of material based on Mott distribution in AUTODYN-3D. The expanding and fragmentation pattern of a shell with caliber 30mm is simulated. The initial velocity, distribution curve of fragments dispersion angle and quality of natural fragments are analyzed in coordinate. The investigation results of numerical simulation are quite agreement with the fragmentation test results of shell.

**Keywords:** shell; natural fragment; numerical simulation; failure model

### 0 引言

近年来,随着计算技术和材料学的发展使得模拟金属壳体破裂和自然破片成为可能,非线性动力分析软件 AUTODYN 开发了基于 Mott 非线性分布的 Stochastic 破坏模型<sup>[1]</sup>,该模型应用概率统计方法模拟自然材料真实缺陷及在爆炸载荷下破碎的过程,对各种复杂几何形状金属壳体的爆炸驱动和破裂过程进行仿真,获得逼近材料真实的破裂和自然破片形成规律。

文中介绍了基于 Mott 分布生成自然破片和 Stochastic 模型的基本原理,应用 AUTODYN 软件和模型模拟了 30mm 口径榴弹的壳体膨胀、自然破片形成过程及分布特征,获得了破片速度、飞散角沿轴向的曲线分布及破片质量分布,将仿真结果与破碎性试验回收的破片质量分布进行了对比,两者结果符合良好。研究结果表明,数值模拟方法可作为自然破片式战斗部优化设计的有效工具。

### 1 仿真计算模型

#### 1.1 Stochastic 模型<sup>[1]</sup>

AUTODYN 软件<sup>[2]</sup>的内置 Stochastic 应力破坏模型基于概率统计方法表征导致物质破坏和裂纹产生的固有缺陷分布,通过在材料模型内随机添加一些弱化点<sup>[1]</sup>来表征材料固有的缺陷分布,并设定弱化点处网格应变不能承受负压力或剪应力,这样可定性描述使用不同分布的 Stochastic 模型时的离散几何体模拟真实材料的破坏模式,根据不同分布得到不同数量和大小的破片。

对金属壳体的内部缺陷,使用一个随机分布设置弱化点来表征其破坏位置,并在壳体内赋予弱化点以不同的破坏期望。在离散化模型中,不同网格的极限破坏应力是通过真实的随机数布设的,所有网格设置相同起始破坏应力。对理想各向同性材料,破坏概率在 $[0, 1]$ 范围内,并以材

\* 收稿日期:2008-03-15

作者简介:蒋建伟(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向:弹药系统与仿真。

料承受应力为自变量曲线。Stochastic 破坏模型选择了描述战斗部自然破片大小和质量分布的 Mott 分布:

$$P = 1 - \exp\left[-\frac{C}{\gamma} e^{\gamma \epsilon}\right] \quad (1)$$

式中:  $P$  是应变  $\epsilon$  时的破坏概率,  $C, \gamma$  是取决于材料性质的常数。

大多数情况下模型中分布参数设置, 在达到材料破坏应变的 45.5% 时开始有弱化点, 破坏起始概率大于 0.05。不同材料有不同的  $C$  常量和  $\gamma$  值, 通常  $\gamma$  值取 10 时破片数量与实验较接近。

### 1.2 小口径榴弹计算模型

图 1 为直径为 30mm 的小口径榴弹, 它由 58SiMn 钢壳、B 炸药和引信组成。其中: 壳体平均壁厚 3mm, 弹底厚 5.3mm, 质量 148.4g; 装药 Comp B, 密度 1.63g/cm<sup>3</sup>, 质量 41.7g; 全弹重 223g。

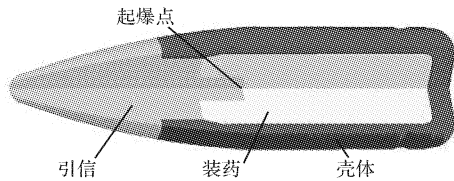


图 1 小口径榴弹结构

采用 AUTODYN-3D 对该弹丸进行三维建模, 建模时忽略弹带部分, 引信用实心铝材代替, 为表征出壳体破裂及不同质量破片空间分布, 建立有足够分辨率的全弹网格模型, 其中网格平均尺寸为壳体 0.5mm, 引信 1.5mm, 装药 1.0mm。壳体网格、引信和装药网格数分别为 148422、8883 和 24613。三维离散模型如图 2。

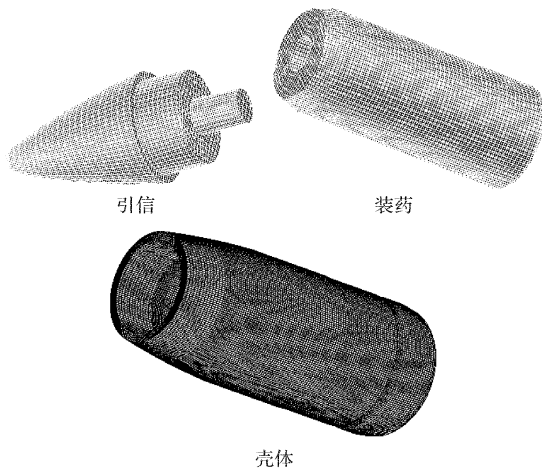


图 2 小口径弹部件的几何离散网格模型  
钢壳、炸药和引信材料采用的状态方程、强

度模型及破坏准则列于表 1。材料参数取自 AUTODYN-3D 材料数据库<sup>[2]</sup>。

表 1 计算所用材料模型

	部件/材料		
	壳体/58SiMn 钢	引信/LC4 铝	炸药/Comp B
状态方程	Shock	Linear	JWL
强度模型	Johnson-Cook	Von-mises	Hydro
破坏准则	MaterialStress/ Strain	MaterialStress/ Strain	/
侵蚀准则	应用	应用	/

采用 Lagrange 方法和自动面接触侵蚀算法进行计算。设置随机应力破坏中的 Mott 分布参数, 可获得壳体材料在不同装药下产生的破片数量和质量分布。

文中计算时选择  $C = 4.67 \times 10^2$  和  $\gamma = 10$ , 并设定随机破坏从材料破坏应力的 50% 开始。

## 2 数值模拟结果及分析

针对建立的 30mm 小口径榴弹离散化模型, 采用 AUTODYN-3D 软件在 HP8200 工作站进行了仿真计算。图 3 为获得展示从起爆开始壳体膨胀、破裂和形成破片过程典型时刻的图像。

从图 3 可以看出, 当起爆至 4 $\mu$ s, 在引信起爆点附近壳体就开始出现轴向破裂, 起爆 8 $\mu$ s 时, 壳体自起爆点开始周向破裂, 并沿轴向扩展, 至起爆 12 $\mu$ s 时刻, 壳体周向已全部破裂, 同时底部出现轴向破裂, 自然破片基本形成; 起爆至 18 $\mu$ s 时, 壳体圆柱部形成以纵向裂纹为主大小不一的自然破片。破片形成的数值模拟过程的描述与实际过程基本一致。

图 4、图 5 描述了壳体破碎时的破片初速和飞散方向角沿轴向分布的模拟结果, 表 2 为自然破片初速、破片飞散方向角以及飞散角的模拟结果。

表 2 数值计算结果

初速分布/(m/s)	平均初速/(m/s)	飞散方向角/(°)	飞散角/(°)
1182~1460	1316	87.1~102.1	15.0

## 3 实验验证

应用 Stochastic 破坏模型<sup>[1]</sup> 预测 30mm 小口径榴弹生成的破片质量分布, 仿真计算出破片总数 926 个, 其中质量大于 0.1g 的破片 446 个, 试验回收质量大于 0.1g 的破片约 400 个, 按质

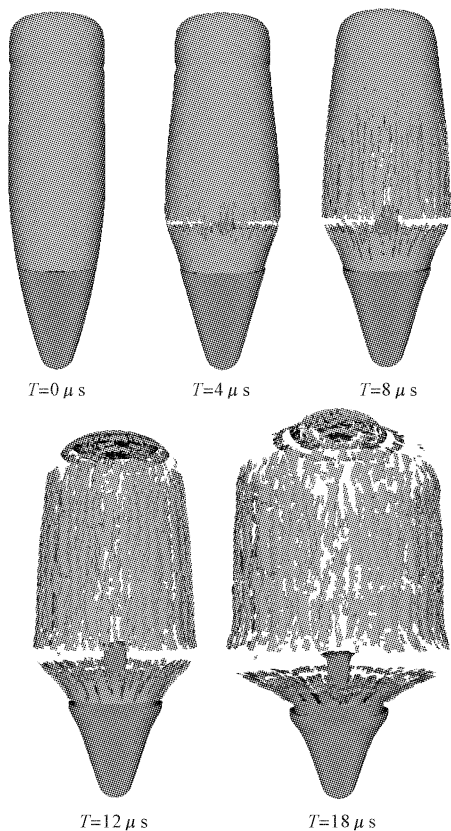


图 3 小口径弹破片形成过程图

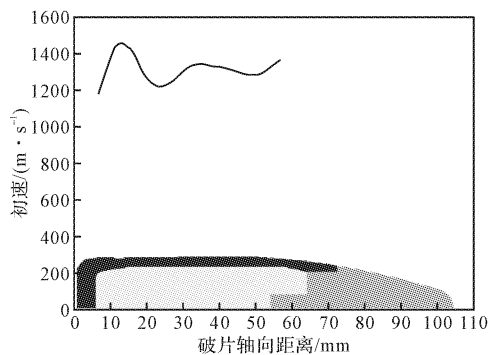


图 4 破片初速沿轴向分布曲线

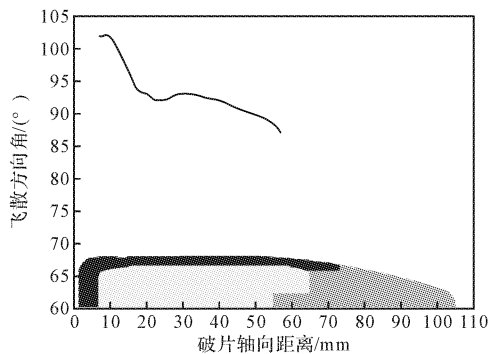


图 5 破片飞散方向角沿轴向分布曲线  
量数量分布比,模拟结果和实验的破片数对比如图 6。

从图 6 可看出计算得到的破片总数和实验

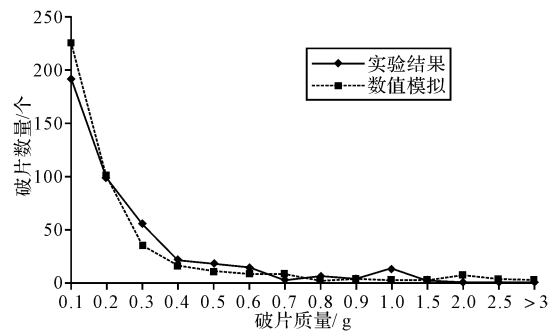
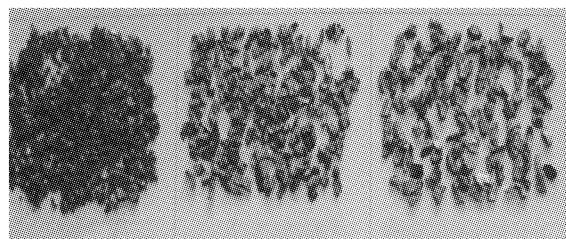
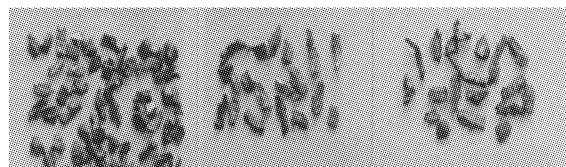


图 6 破片质量、数量的数值模拟与实验对比图  
有一定的出入,但破片数量、质量分布与实验吻合较好,证明数值模拟的材料参数选择可取,计算得到的大部分破片质量在 0.1~0.8g 之间。由于计算模型是一定尺度的离散,计算中生成一些很小质量破片,故取质量大于 0.1g 的破片为有效破片,质量小于 0.1g 的破片忽略不计。

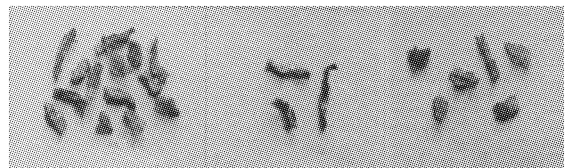
图 7 为对该 30mm 小口径榴弹进行了扇形



(a)小于0.1g 共22.8g (b)0.1~0.19g 共25.8g (c)0.2~0.29g 共24.5g



(d)0.3~0.39g 共18.5g (e)0.4~0.49g 共8.3g (f)0.5~0.59g 共9.2g



(g)0.6~0.69g 共8.8g (h)0.7~0.79g 共2.2g (i)0.8~0.89g 共4.9g



(j)0.9~0.99g 共3.6g (k)1.0~1.49g 共14.9g (l)2.0~2.49g 共2.1g

图 7 爆炸回收破片分布

靶回收破片试验,爆炸后按质量范围回收的类别的破片。试验时弹丸距靶板 8.2m,试验后对形成的破片进行分类统计,验证了使用 Stochastic 材料破坏模型在基于 Mott 分布下生成随机自然

破片的数值模拟方法可行,使对爆炸破碎瞬态以及单个破片迹线的分析和描述能更准确的实现,但对模拟破片的速度及飞散角的分布还有待进一步实验验证。

## 4 结论

应用 Stochastic 应力破坏模型对 30mm 直径小口径榴弹的壳体膨胀、自然破片形成过程进行了数值模拟,获得了破片初速、飞散角沿轴向分布以及破片质量分布结果。通过破碎性试验验证和破片回收对比,表明采用 Stochastic 材料破坏模型进行仿真计算可以清晰地描述榴弹破裂和自然破片的形成过程,较准确地预测包括破片质量、初速和飞散角等破片的威力参数,实现随机破片的量化分析。

参考文献:

[1] Jonathan P Glanville, Greg Fairlie, Colin Hay-

hurst, et al. Numerical simulation of fragmentation using AUTODYNTM 2D & 3D in explosive ordnance safety assessment [C]// 6th PARARI International Explosive Ordnance Symposium. Canberra, Australia, 29-31 October 2003;2-8.

[2] Interactive non-linear dynamic analysis software AUTODYNTM user manual [M]. revision 4. 3 Century Dynamics Inc. 2003.

[3] 张崇玉,谷岩,张世文,等. 爆轰波对碰驱动下金属圆管膨胀变形特性研究 [J]. 爆炸与冲击, 2005,25(3):2-4.

[4] Yang Yunbin, Qu Ming, Qian Lixin. The study on lethality simulation method for fragmentation warhead [C]// 22nd International Symposium on Ballistics, Vancouver BC Canada, 14-18 November 2005;2-8.

(上接第 113 页)

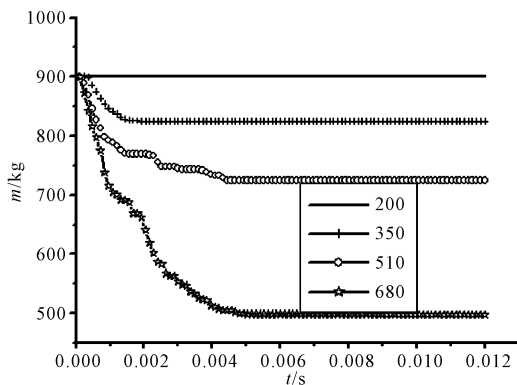


图 12 弹体质量变化时程曲线

2)在一定范围内,命中速度越高,侵彻弹体加速度峰值和质量损失急剧增加,弹体破坏严重,表明刚玉块石混凝土遮弹层具有优良的抗弹丸高速侵彻特性;

3)刚玉块石越大,刚玉块石混凝土抗侵彻性能越强,但超过一倍弹径之后,弹体侵彻深度减小不明显,一倍弹径大小的刚玉块石是抗某航弹的理想尺寸;

4)刚玉块石之间填充混凝土宽度对刚玉块

石混凝土抗侵彻能力影响明显,填充混凝土的宽度越大,弹体侵彻深度越大,填充宽度以不超过 0.10 倍弹径为宜。

参考文献:

[1] 唐德高,贺虎成,陈向欣,等. 刚玉块石混凝土抗弹丸侵彻效应试验研究 [J]. 振动与冲击, 2005, 24(6):37-39.

[2] 周布奎,唐德高,陈向欣,等. 刚玉块石抗侵彻特性试验研究 [J]. 实验力学, 2004, 19(1):79-84.

[3] 周布奎,周早生,唐德高,等. 刚玉块石粒径对刚玉块石抗侵彻性能影响的试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(4):370-375.

[4] 周布奎,周早生,唐德高. 命中角对刚玉块石混凝土抗侵彻性能影响的试验研究 [J]. 防护工程, 2004, 26(5):18-22.

[5] 周布奎,唐德高,周早生,等. 命中速度对刚玉块石混凝土抗侵彻性能的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1):59-63.

[6] 贺虎成,刘晓华,唐德高. 弹体冲击效应试验的数值模拟分析 [J]. 振动与冲击, 2007, 26(11):91-94.