

doi: 10.7690/bgzdh.2013.11.005

## 大口径榴弹自然破片形成过程

黄经纬, 李文彬, 郑宇, 陈伟

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

**摘要:** 为获得典型大口径常规战斗部自然破片质量分布、破片初速等变化规律, 利用水井爆炸装置, 对某 155 mm 大口径榴弹自然破片的形成过程进行了破碎性试验研究, 并与 Mott 公式预测计算结果进行了对比; 同时基于 Stochastic 随机失效模型, 采用 AUTODYN 软件对试验榴弹自然破片形成过程作进一步仿真模拟, 获得了破片质量分布、破片初速等变化规律。仿真结果表明: 4 g 以上的破片数量与试验结果吻合较好, 总体分布趋势基本完全一致, 4 g 以下的破片数量存在误差。

**关键词:** 大口径榴弹; 破碎性试验; 自然破片; 仿真模拟

**中图分类号:** TJ410.6 **文献标志码:** A

## Formation of Natural Fragments from Large Caliber Shells

Huang Jingwei, Li Wenbin, Zheng Yu, Chen Wei

(Key Subject Laboratory of National Defense for Intelligence Ammunition Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to obtain the regular patterns of the natural fragments quality distribution and initial velocity of large caliber typical conventional warheads, using water well explosive device, several static detonating tests of 155 mm caliber shells was studied, and compared with the forecast results calculated by Mott formula. Moreover, based on Stochastic failure models, using AUTODYN software further simulated the formation of natural fragments referred to the test shells, the regular patterns of the fragment quality distribution and initial velocity were got. It was found that the whole tendency between the two was mainly fit, especially, the number of the large quality area ( $\geq 4$  g) was quite agreement with each other, but there were some errors in small quality area ( $\leq 4$  g).

**Key words:** large caliber shell; fragmentation test; natural fragments; simulation

### 0 引言

破碎性试验是测定榴弹破片质量分布的一种重要试验方法。针对弹药爆炸自然破片的形成过程, 目前国内学者作了一些研究, 蒋建伟等<sup>[1-2]</sup>采用仿真软件, 对小口径榴弹自然破片的形成过程进行了数值模拟, 同时也对 PELE 弹侵彻过程中壳体的膨胀破裂进行了数值模拟, 获得了破片的质量分布和破片初速等变化规律, 计算模型的准确性是否同样适用于大口径榴弹有待进一步验证。宋桂飞等<sup>[3-4]</sup>对封闭爆炸条件下废旧小口径弹药的破片质量分布进行了分级统计, 并结合 Mott 公式对破片质量分布进行了预测, 试验统计结果与经验公式预测结果存在一定的误差。相比之下, 对于大口径弹丸爆炸后自然破片的形成过程研究得较少, 随着弹丸口径和装药量的增加, 自然破片的初速、质量分布等规律是否会产生变化, 都有待于研究。

鉴于当前国内对弹药破片的研究还处于初步阶段, 特别是典型大口径常规战斗部自然破片的形成过程研究, 笔者通过破碎性试验方法研究了 155 mm

大口径榴弹自然破片的形成过程, 获得了榴弹静爆后自然破片质量分布规律, 与 Mott 公式预测结果基本吻合。同时, 基于 Stochastic<sup>[5]</sup>随机失效模型, 采用 AUTODYN 软件对试验榴弹自然破片形成过程作了进一步仿真模拟, 获得了破片质量分布、破片初速等变化规律。

### 1 试验研究

#### 1.1 试验设计

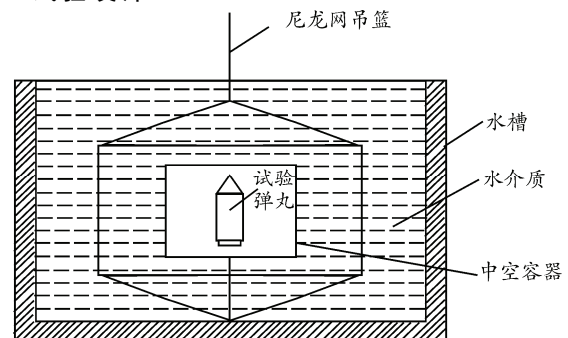


图 1 破碎性试验装置

试验共进行 5 发 155 mm 大口径榴弹的破碎性

收稿日期: 2013-05-17; 修回日期: 2013-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(51278250)

作者简介: 黄经纬(1988—), 男, 湖北人, 硕士研究生, 从事弹丸的终点效应和目标毁伤技术研究。

试验研究，采用水作减速介质，用尼龙网吊篮回收破片，试验装置示意图如图 1 所示。

### 1.2 试验结果统计

破片质量分布范围的分级方法有 2 种：9 级和 31 级。笔者采用 9 级分级方法对自然破片进行质量分级统计。基于破片回收和运输的方便，首先将 5 发榴弹爆炸所产生的自然破片回收在一起，统计所有破片的质量分布情况，然后按照平均值法，计算得出单发榴弹爆炸所形成破片的质量分布情况。所有破片按质量分类情况如图 2，统计结果见表 1。

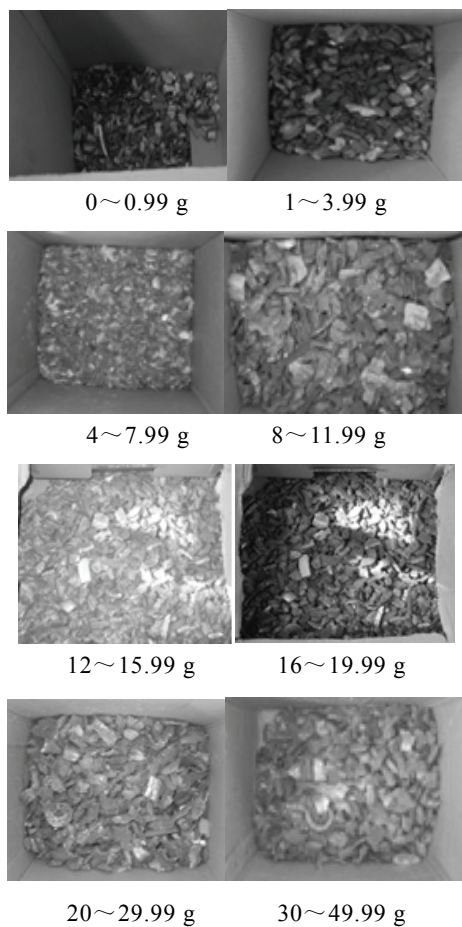


图 2 破片质量分布统计结果

表 1 某 155 mm 榴弹破片质量分布统计结果

质量范围/g	破片总数/块	破片总重/kg	单发破片数/块	单发破片重/kg
<1	10 361	5.2	2 027	1.04
1~4	14 933	22.1	2 987	4.42
4~8	3 524	19.1	705	3.82
8~12	2 071	19.5	414	3.90
12~16	1 079	15.6	216	3.12
16~20	642	11.8	128	2.36
20~30	726	17.6	145	3.52
30~50	432	18.0	86	3.60
50~100	125	8.4	25	1.68
合计	33 893	137.3	6 779	27.46

### 1.3 试验结果分析

破片的质量分布可以通过 Mott 公式<sup>[6]</sup>进行预测计算。对于非预制破片薄壁弹体，其爆炸过程符合二维破碎结果，其破片质量分布的最终表达式为：

$$N(m_f) = \frac{m_s}{2\mu} e^{-(m_f/\mu)^{0.5}} \quad (1)$$

式中： $N(m_f)$ 表示质量大于 $m_f$ 的破片数，kg； $m_s$ 为弹壳金属总质量，kg； $\mu$ 为弹丸的结构参数，等于破片平均质量的 1/2，取决于弹体结构、材料以及炸药性质。Mott 建立了弹体内径 $d_i$ 、壁厚 $\delta$ 与 $\mu$ 的关系，如式 (2)：

$$\mu^{1/2} = K\delta^{5/6}d_i^{1/3}(1 + \delta/d_i) \quad (2)$$

式中， $\mu$ 为弹丸的结构参数， $K$ 取决于炸药与弹体金属物理特性的常数。

试验榴弹的主要参数如表 2 所示，利用 Mott 公式预测结果与试验结果对比情况见表 3。

表 2 试验榴弹计算参数

$\delta/m$	$d_i/m$	$K/(kg^{1/2}/m^{7/6})$	$m_2/kg$
0.019	0.117	1.83	140

表 3 Mott 公式计算结果与试验结果对比

质量范围/g	试验结果/5 发	计算结果/5 发	误差/%
<1	10 361	26 746	158.1
1~4	14 933	11 724	21.5
4~8	3 524	4 529	28.5
8~12	2 071	1 885	9.0
12~16	1 079	977	9.5
16~20	642	568	11.5
20~30	726	671	7.6
30~50	432	380	12.0
50~100	125	128	2.4
合计	33 893	47 619	27.46

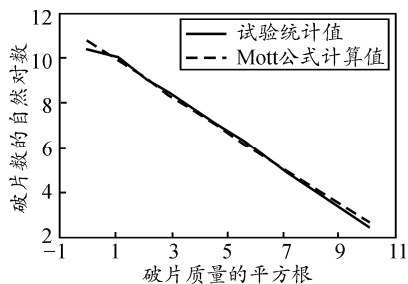


图 3 破片质量分布曲线

由表 3 可知，试验收集的总破片数达 33 893 块，大多数破片都分布在 4 g 以下的范围，4 g 以上的破片近似呈逐渐减少的趋势。通过对比发现：大质量范围内 ( $\geq 4$  g) 破片数量，公式预测结果与试验统计结果吻合较好；而小质量范围内 ( $\leq 4$  g) 破片数量，二者存在一定的差距，特别是 1 g 以下的破片数量

相差明显，这与破片收集完整度以及小质量范围破片的统计难度等因素有关。从破片的质量分布曲线图(如图 3)能更清晰地看出，虽然大口径榴弹自然破片质量分布与 Mott 公式的预测存在一定误差，但总体趋势基本吻合，证明了 Mott 公式对大口径榴弹破片质量分布预测的参考意义。

## 2 仿真模拟计算

### 2.1 仿真模型建立

结合试验榴弹结构，弹丸内径  $d=110\text{ mm}$ ，外径  $D=155\text{ mm}$ ，长度  $L=660\text{ mm}$ ，将仿真模型主要简化为壳体和装药 2 个部分。其中，壳体材料采用高破片率钢 50SiMnVB，质量为 40 kg；装药选 TNT，密度  $1.63\text{ g/cm}^3$ ，质量为 8.0 kg。

由于模型较大，为了节省计算时间，笔者采用 AUTODYN-3D 建立了 1/4 三维仿真模型(如图 4 所示)，利用 Truegrid 软件进行网格划分。壳体及装药采用的状态方程、强度模型以及失效模型见表 4。壳体材料参数取自文献 [7]，炸药参数取自 AUTODYN 材料数据库。

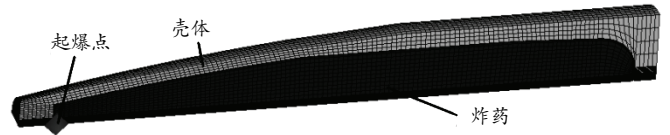


图 4 1/4 仿真模型

表 4 材料模型

部件	材料	状态方程	强度模型	失效模型	侵蚀准则
壳体	50SiMnVB	Linear	Johnson-Cook	Principal Stress	应用
装药	TNT	JWL	无	无	应用

壳体和装药均采用 Lagrange 算法并附加侵蚀算法，壳体使用主应力失效，采用 Stochastic 模型<sup>[5]</sup>，通过设置 Stochastic 随机失效模型中的 Mott 分布参数，以获取不同壳体材料下的破片质量分布。计算时，笔者取材料常数  $C=0.0467$ ， $\gamma=10^{[2,5]}$ ，并设定随机破坏从材料破坏应力的 50% 开始，破坏应力取材料屈服极限的 90%。

### 2.2 仿真结果及分析

采用前述的仿真模型，对 155 mm 大口径榴弹静爆自然破片形成过程进行数值模拟。起爆后，榴弹壳体经膨胀、破裂至自然破片的形成过程如图 5。

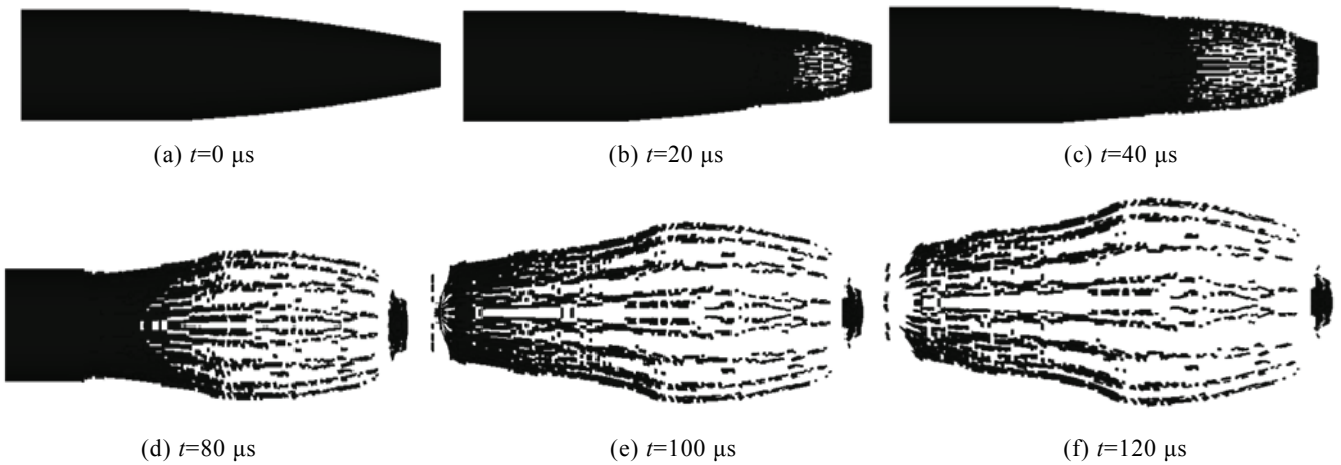


图 5 大口径榴弹破片形成过程

由图 5 可以看出，当起爆至 20  $\mu\text{s}$  时，起爆点附近壳体开始出现轴向破裂；40  $\mu\text{s}$  时，轴向破裂增大，同时从起爆点位置开始出现径向破裂；80  $\mu\text{s}$  时，轴向破裂进一步增大，头部弧形部分径向破裂基本完成，同时弹头部在起爆点附近已完全分离；100  $\mu\text{s}$  时，轴向和径向已全部破裂，同时弹底部出现轴向破裂，自然破片基本形成，大部分破片呈长条形；120  $\mu\text{s}$  时，弹体径向膨胀显著，呈腰鼓形，最大直径达到 330 mm，增加了原直径的 1.1 倍，形

成了以轴向裂纹为主、大小不一的自然破片。自然破片形成过程的仿真结果与榴弹的破碎机理吻合，与实际的爆炸过程基本一致。

图 6 描述了榴弹壳体破碎后，破片初速沿轴向的分布情况。从图 6 可以看出，绝大部分破片初速分布在 800~1 300 m/s 之间。弹头圆弧部破片速度波动较大；圆柱部破片速度波动较小，基本均一；弹尾部破片速度都不太均一，波动较大。



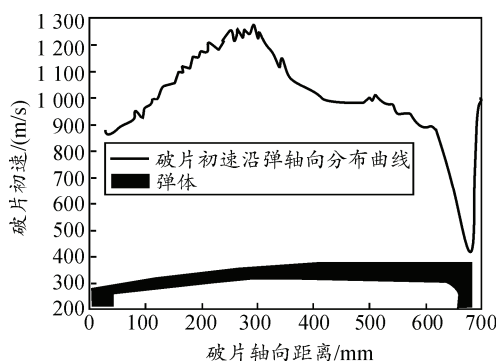


图 6 破片初速沿轴向分布情况

图 7 描述了榴弹壳体破碎后，所形成的自然破片的质量沿弹体轴向的分布情况。从图 7 可以看出，弹体头部破片和圆柱部破片质量整体上都比较均一，头部破片较圆柱部破片小，弹尾部破片大小不一，大质量破片基本都在弹尾部产生。

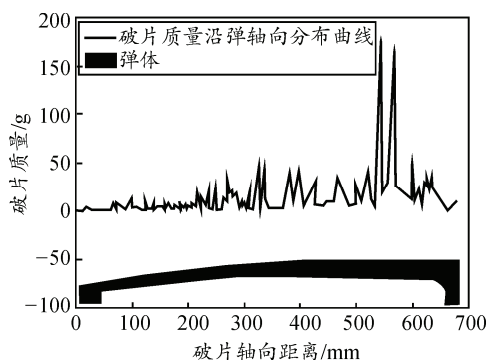


图 7 破片质量沿轴向分布情况

对 1/4 模型进行结果统计，共形成了 643 个自然破片(全模型视为 2572 个)，其中质量大于 4 g 的破片有 1500 个，试验回收质量大于 4 g 的破片约为 1719 个。图 8 是按破片质量分级统计、仿真结果、试验结果以及 Mott 公式计算结果的对比情况。

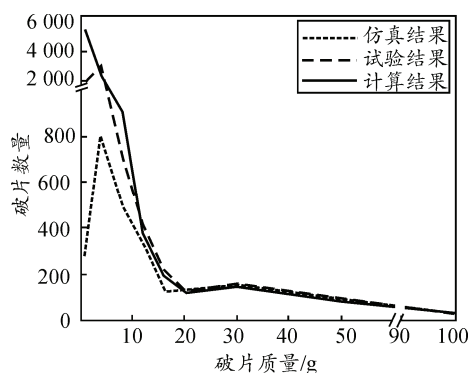


图 8 破片质量分级统计对比情况

从图 8 可以看出，仿真计算得到的破片总数明显小于试验统计和公式计算得到的结果，这主要因

为 4 g 以下的破片数量小于试验和公式计算的数量，但 4 g 以上的破片数量与试验结果吻合较好，总体分布趋势基本完全一致。同时，证明了基于 Stochastic 随机失效模型，对大口径榴弹自然破片形成过程模拟的可行性，但如何使得小质量范围内 ( $\leq 4$  g) 破片分布与试验结果较好的吻合，有待于进一步研究。

### 3 结论

1) 通过破碎性试验，研究了 155 mm 大口径榴弹静爆后自然破片的形成过程，得到了破片的质量分布，与小口径榴弹质量分布规律类似，大多数破片分布在小质量范围内；与 Mott 公式预测结果进行对比发现：二者总体趋势相同，特别是大质量范围内 ( $\geq 4$  g) 破片数量吻合较好；小质量范围内 ( $\leq 4$  g) 破片数量存在一定误差。

2) 基于 Stochastic 随机失效模型，采用 AUTODYN 软件对试验榴弹自然破片形成过程作了进一步仿真模拟，获得了破片质量分布、破片初速等变化规律；自然破片形成过程的仿真结果与榴弹的破碎机理吻合，与实际的爆炸过程基本一致。

3) 通过仿真模拟结果与试验结果的对比发现，4 g 以上的破片数量与试验结果吻合较好，总体分布趋势基本完全一致，4 g 以下的破片数量存在误差；因此，如何使小质量范围内 ( $\leq 4$  g) 破片数量分布与试验结果较好地吻合，还有待于进一步研究。

### 参考文献：

- [1] 蒋建伟, 张谋, 门建兵. 小口径榴弹自然破片形成过程的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1): 114-117.
- [2] 蒋建伟, 张谋, 门建兵, 等. PELE 弹侵彻过程壳体膨胀破裂的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2009, 26(4): 568-572.
- [3] 宋桂飞, 李成国. 废旧弹药封闭爆炸的破片质量分布[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(1): 128-130.
- [4] 宋桂飞, 李成国. 爆炸洞内废旧弹药破片质量分布[J]. 兵工自动化, 2007, 26(4): 29.
- [5] Jonathan P Glanville, Greg Fairlie, Colin Hayhurst. Numerical Simulation of Fragmentation Using AUTODYN-2D & 3D in Explosive Ordnance Safety Assessment[C]//6th PARARI International Explosive Ordnance Symposium. Canberra, Australia, 29-31 October 2003: 2-8.
- [6] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 79-80.
- [7] 常列珍. 50SiMnVB 合金钢动态力学性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2007: 26-28.