

# 第五章 杀伤作用

## 5.1 概述

杀伤弹爆炸后，弹体内部的炸药爆炸将迫使壳体向外作快速膨胀，膨胀到一定程度后，壳体上开始出现破裂面，破裂面相互贯通使壳体全部破裂成破片并以一定的初速向四周飞散以杀伤目标。

从机理上将壳体破裂分为:拉伸和剪切

壳体破裂面的传播一般遵循如下准则:

- 1.破裂面一出现，就向两侧垂直方向传出卸载波；
- 2.破裂面如扩及其它破裂面，则破裂扩展过程停止；
3. 破裂面如扩及与它平行的其它破裂面所发出的卸载波区，则破裂扩展过程也将停止。

## 5.1 概述

### 破片分类:

- 1.自然破片 由整体壳体广王的破片;
- 2.可控破片 用机械力法削弱壳体或利用炸药的局部聚能效应来控制壳体的破裂所形成的破片;
- 3.预制破片 将预先制造的抛射体组装在较薄的壳体内, 炸药爆炸后即成为数量众多的预制破片。

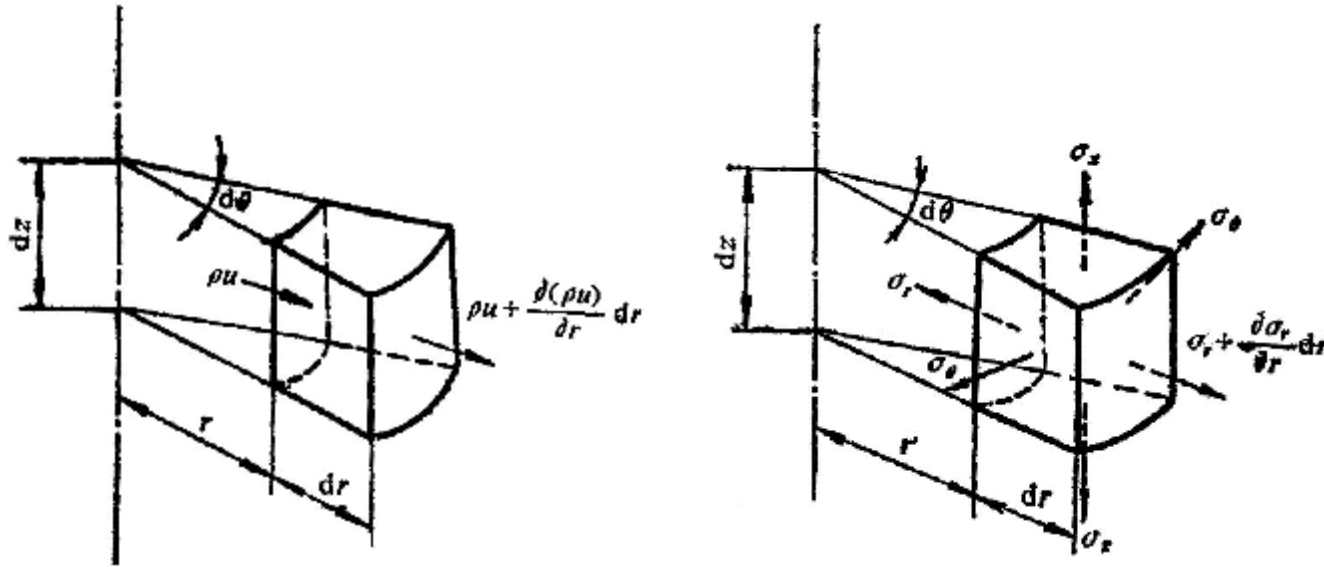
## 5.2 破片初速计算

### 爆炸作用下弹体破裂的刚塑性模型

该模型假设条件是：

1. 炸药瞬时爆轰，只考虑壳体的一维径向运动；
2. 壳体在变形过程中，应力波已在其中多次反射，即不讨论应力波的传播作用；
3. 由于所研究的问题为壳体的大变形问题，其弹性阶段可不考虑，采用不可压缩理想刚塑性材料模型。

## 5.2 破片初速计算



根据质量守恒条件得：

$$\frac{\partial}{\partial t} (r r d r d q d r) d t = r u r d r d q d z d t - \left( r u r + \frac{\partial r u r}{\partial r} d r \right) d q d z d t$$

$$r \frac{\partial r}{\partial t} = - \frac{\partial r u r}{\partial r} \quad \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial r u r}{\partial r} + \frac{r u}{r} = 0$$

## 5.2 破片初速计算

- 根据动量守恒条件得：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(urrdqdzdr)dt = ururdqdzdt \\ & + (urur + \frac{\partial urur}{\partial r} dr)dqdzdt - S_r rdqdzdt \\ & + (S_r r + \frac{\partial S_r r}{\partial r} dr)dqdzdt - 2 \times \frac{S_q}{2} drdqdzdt \end{aligned}$$

$$r \frac{du}{dt} = -\frac{\partial S_r}{\partial r} + \frac{S_r - S_q}{r}$$

## 5.2 破片初速计算

采用米赛斯(Mises)屈服准则来考察壳体材料的失效

$$(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2 + (\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3)^2 + (\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_1)^2 = 2\mathbf{s}_Y^D$$

$$(\mathbf{s}_q - \mathbf{s}_r)^2 = 1.15\mathbf{s}_Y^D$$

$$\mathbf{s}_r = -p_1 + 1.15\mathbf{s}_Y^D \ln \frac{r}{a} + r \left[ (u_a^2 + a \frac{du_a}{dt}) \ln \frac{r}{a} - \frac{u_a^2}{z} (1 - \frac{a^2}{r^2}) \right]$$

$$\mathbf{s}_q = -p_1 + 1.15\mathbf{s}_Y^D (1 + \ln \frac{r}{a}) + r \left[ (u_a^2 + a \frac{du_a}{dt}) \ln \frac{r}{a} - \frac{u_a^2}{2} (1 - \frac{a^2}{r^2}) \right]$$

$$\mathbf{s}_z = -p + 1.15\mathbf{s}_Y^D (\frac{1}{2} + \ln \frac{r}{a}) + r \left[ (u_a^2 + a \frac{du_a}{dt}) \ln \frac{r}{a} - \frac{u_a^2}{2} (1 - \frac{a^2}{r^2}) \right]$$

## 5.2 破片初速计算

破片初速

$$v_0 = \left\{ \frac{4p_0}{r(ng-2) \left( \frac{b_0^2}{a_0^2} - 1 \right)} \left[ 1 - \left( \frac{1.15S_Y^D}{p_0} \right)^{\frac{ng-2}{ng}} \right] - \frac{2.3S_Y^D}{r} \ln \left( \frac{p_0}{1.15S_Y^D} \right)^{\frac{1}{ng}} \right\}^{\frac{1}{2}}$$



## 5.2 破片初速计算

### 计算破片初速的能量模型

根据能量守恒条件得：

$$E_H = E_c + E_m + E_g + E_e + E_i$$

$$E_H = mQ_v$$

$$E_c = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{2} v_0^2 = \frac{v_0^2}{2} \sum_{i=1}^N m_i = \frac{1}{2} M v_0^2$$

$$E_M = \frac{M}{r} A_p^D$$

$$E_g = \frac{m v_0^2}{y}$$

球形壳体  $y = \frac{2(2n+3)}{3}$

圆柱壳体  $y = 2n + 2$

平面壳体  $y = 2(2n + 1)$

## 5.2 破片初速计算

$$E_e = me_e = m \int_{n_f}^{\infty} p dn = \int_{n_f}^{\infty} A n^{-g} dn = m \frac{n_f p_f}{(g-1)}$$

$$E_i = r_0 v_0^2 W_0 \frac{(k+1)}{2} \left[ \left( \frac{R_f}{R_0} \right)^N - 1 \right]$$

$$mQ_v = \frac{1}{2} M v_0^2 + \frac{MA_p^D}{r} + \frac{mv_0^2}{y} + \frac{n_f p_f m}{(g-1)}$$

球形壳体  $W_0 = \frac{4}{3} p R_0^3, N=1$

圆柱壳体  $W_0 = p l R_0^2, N=2$

$$+ \frac{r_a v_0^2 W_0}{2} (k+1) \left[ \left( \frac{R_f}{R_0} \right)^N - 1 \right]$$

平面壳体  $W_0 = S_0 R_0, N=3$

## 5.2 破片初速计算

$$v_0 = \sqrt{(Q_v - e_e) \frac{2b}{1 + \frac{2b}{y}}} \quad \sqrt{(Q_v - e_e)} = \frac{D}{4}$$

$$v_0 = \frac{D}{4} \sqrt{\frac{2b}{1 + \frac{2b}{y}}} \quad v_{0m} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{b}{2}}$$

## 5.2 破片初速计算

### 计算破片初速的动量模型

- 假设：
1. 炸药瞬时爆轰
  2. 炸药的能量全部用于爆轰产物和壳体的飞散
  3. 爆轰产物的飞散速度从中心到壳体是线形分布的，爆轰产物的虚拟质量取能量模型给出的值。

## 5.2 破片初速计算

球形壳体 :

$$v = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{5b}{2(5+3b)} \left[1 - \left(\frac{R}{R_0}\right)^6\right]}$$

$$v_0 = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{b}{2} \left[1 - \left(\frac{R}{R_0}\right)^6\right]}$$

$$v = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{b}{2}} \quad t = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{2(5+3b)}{5b}} \int_{R_0}^R \frac{R^3}{\sqrt{R^6 - R_0^6}} dR$$

圆柱壳体 :

$$v_0 = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{b}{2+b}} \quad t = \frac{2}{D} \sqrt{\frac{2+b}{b}} \int_{R_0}^R \frac{R^2}{\sqrt{R^4 - R_0^4}} dR$$

$$v = \frac{D}{2} \frac{b}{2+b} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R}\right)^4\right]$$

## 5.3 破片初速沿壳体的分布

- 破片初速：

1. 药柱一端起爆

$$v_x = v'_0 \left( \frac{i_x}{i_0} \right)$$

$$i_x = \frac{i_0}{8} \left[ 1 + 6a(1-a) + \frac{3}{2}a \ln \frac{3-2a}{3} + 6a(1-a)(2a-1) \ln \frac{3-2a}{2(1-a)} \right]$$

$$v_0 = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{b}{2+b} \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^4 \right]}$$

$$v_x = \frac{D}{16} \sqrt{\frac{b}{2+b} \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^4 \right] \left[ 1 + 6a(1-a) + \frac{3}{2}a \ln \frac{3-2a}{3} + 6a(1-a)(2a-1) \ln \frac{3-2a}{2(1-a)} \right]}$$

## 5.3 破片初速沿壳体的分布

### 2. 药柱两端起爆

$$i_x = \frac{i_0}{8} \left\{ \frac{8-a^3}{(1.7-a)^2 \times 2.025} - \frac{3a^2}{(1.7-a) \times 1.42} + \frac{3a}{2} \ln \left[ \frac{1.42}{a} (1.7-a) \right] + \frac{15a}{4} + \frac{1.42(1.7-a)}{4} \right\}$$

$$v_x = \frac{D}{16} \sqrt{\frac{b}{2+b} \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^4 \right]} \left[ \frac{8-a^3}{2.025 \times (1.7-a)^2} - \frac{2.11a^2}{(1.7-a)} + \frac{3a}{2} \ln \frac{1.42(1.7-a)}{a} + 3.75a + 0.355(1.7-a) \right]$$

### 3. 药柱中间截面起爆

$$i_x = \frac{i_0}{16} \left[ \frac{16+23a+8a^2-15a^3}{(1+a)^2} - 3(1-a) \ln \frac{1+a}{1-a} + 3a \ln 2 \right]$$

$$v_x = \frac{D}{32} \sqrt{\frac{b}{2+b} \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^4 \right]} \left[ \frac{16+23a+8a^2-15a^3}{(1+a)^2} - 3(1-a) \ln \frac{1+a}{1-a} + 3a \ln 2 \right]$$

## 5.3 破片初速沿壳体的分布

### 4. 瞬时爆轰

$$i_x = \frac{i_0}{8} \left[ \frac{9}{2}a + \frac{9}{16} \left( 2 - \ln \frac{a}{2-a} - \frac{3a^2}{2-a} - \frac{a^3}{2(2-a)^2} + \frac{3}{2}a \right) + \frac{9}{4(2-a)^2} \right]$$

### 5. 瞬时爆轰，药柱装于两端有底的圆管内

$$i_x = \frac{i_0}{8} \left\{ \frac{9a}{2} + \frac{9}{16} \left[ 2 - 2a - 3 \left( a + \frac{3}{2b_c} \right) \ln \left( \frac{a + \frac{3}{2b_c}}{2 - a + \frac{3}{2b_c}} \right) - \frac{3 \left( a + \frac{3}{2b_c} \right)^2}{2 - a + \frac{3}{2b_c}} - \frac{\left( a + \frac{3}{2b_c} \right)^3}{2 \left( 2 - a + \frac{3}{2b_c} \right)^2} + \frac{7}{2} \left( a + \frac{3}{2b_c} \right) \right] + \frac{9}{4} \frac{\left( a + \frac{3}{2b_c} \right)^3}{\left( 2 - a + \frac{3}{2b_c} \right)^2} \right\}$$



## 5.3 破片初速沿壳体的分布

$$v_x = \frac{D}{16} \sqrt{\frac{b}{2+b} \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{R_f} \right)^4 \right]} \left\{ \frac{9a}{2} + \frac{9}{16} \left[ 2 - 2a - 3 \left( a + \frac{3}{2b_c} \right) \ln \left( \frac{a + \frac{3}{2b_c}}{2 - a + \frac{3}{2b_c}} \right) - \frac{3 \left( a + \frac{3}{2b_c} \right)^2}{2 - a + \frac{3}{2b_c}} - \frac{\left( a + \frac{3}{2b_c} \right)^3}{2 \left( 2 - a + \frac{3}{2b_c} \right)^2} + \frac{7}{2} \left( a + \frac{3}{2b_c} \right) + \frac{9}{4} \frac{\left( a + \frac{3}{2b_c} \right)^3}{\left( 2 - a + \frac{3}{2b_c} \right)^2} \right] \right\}$$

## 5.3 破片初速沿壳体的分布

计算破片初速的冲量方法

$$v_0 = \frac{I}{M} = \frac{36}{27} B \frac{m}{M} \left( \frac{l}{2R_0} \right) D$$

冲量方法适用于长径比小的情况，而能量法适用于长径比较大的情况

## 5.4 破片在空气中的运动

破片在空气中的速度:

$$v_R = v_0 e^{-\frac{C_D r_a \bar{S}}{2M_e} R} = v_0 e^{-aR} \quad a = \frac{C_D r_a \bar{S}}{2M_e}$$

影响衰减系数的因素:

1. 飞行破片的质量
2. 破片迎面空气阻力系数: 破片的空气阻力系数与破片飞行速度及形状有关。

3. 当地空气密度  $r_a = r_0 H(Y)$

4. 破片迎风面积  $\bar{S} = \left( \frac{4}{p^2} \frac{(xy + y + x)}{(xyr)^{\frac{2}{3}}} \right) M_e^{\frac{2}{3}} = f M_e^{\frac{2}{3}} \quad f = \frac{4}{p^2} \frac{(xy + y + x)}{(xyr)^{\frac{2}{3}}}$

## 5.4 破片在空气中的运动

破片形状	球形	正立方体形	圆柱形
$\Phi(\text{kg}^{-\frac{2}{3}}\text{m}^2)$	$3.07 \times 10^{-3}$	$3.09 \times 10^{-3}$	$3.347 \times 10^{-3}$
	平行四边形	菱形	长方形
	$(3.4 \sim 4.3) \times 10^{-3}$	$(3.2 \sim 3.4) \times 10^{-3}$	$(3.3 \sim 3.8) \times 10^{-3}$

## 5.5 杀伤威力

### 杀伤标准

**杀伤威力：**杀伤威力除了与破片数量、质量、初速、飞散方向等破片初始参数有关外，还与弹丸或战斗部爆炸瞬时的速度、弹道倾角、爆炸点与目标的相对位置等弹道终点参数有关。

进行杀伤威力计算一般要取得以下实验数据

1. 通过爆坑实验得到破片数随质量的分布；
2. 测得破片的初速；
3. 通过球形靶实验得到破片在靶上的分布。

## 5.6 破片性能影响因素

### 炸药性质

1. 爆速
2. 爆热
3. 炸药成份

### 壳体

1. 采用高破片率的壳体材料
2. 预制破片
3. 可控破片

## 5.6 破片性能影响因素

### 可控破片

- 1.采用多层壳体，预制壳体的环向破坏；
- 2.用塑料、纸板等材料作药形衬套，使炸药上带有小聚能沟槽，从而使炸药爆炸后能按需要切割壳体形成破片；
- 3.用刻槽环制作壳体；
- 4.用刻槽的钢带绕制壳体；
- 5.将内壁刻槽的筒旋锻或收口制成壳体；

## 5.7 创伤弹道

**定义：**研究枪弹头、破片等抛射体在人体内的运动规律及其对机体影响的学科叫创伤弹道学。它是介于终点弹道学与创伤外科之间的边缘学科。

**目的：**

- 1.指导杀伤武器的研制、试验；
- 2.为火器伤的诊断、治疗及预防提供理论根据和处理原则。

**基本方法：**

- 1.是战场实际调查统计
- 2.动物实验研究，
- 3.非生物模拟实验。



## 5.7 创伤弹道

### 抛射体致伤机理

当高速抛射体进入组织时，组织微团在抛射体作用下获得动能后，又在惯性力作用下从弹道向外喷射，即沿着某一曲线与抛射体表面分离，并在其后方形成一小空腔，这些大量的小空腔联合就形成了连续而扩大的空腔。

### 组织对抛射体的反应

$$L_{\max} = 46.3r_0 \ln\left(\frac{v_0}{84}\right)$$

### 影响致伤效应的物理因素

抛射体的速度、质量和软度。

## 5.7 创伤弹道

创伤弹道的形态:

贯通伤道

盲管伤道

切线伤道