

# 火工品中飞片起爆的工程计算

周天胜 陈庆生

(华东工学院二系, 南京 210014)

**摘要** 本文就飞片撞击起爆炸药做了工程计算方法上的研究, 给出了一套有关评价炸药能否引爆的计算公式, 其结果对火工品和传爆序列的设计以及传爆可靠性分析都具有很好的参考价值。

**关键词** 起爆 飞片 冲击波 炸药

## 1. 前言

长期以来, 在火工品的研制和传爆序列的设计中, 评价火工品传爆能力的唯一方法是进行发火实测。当要求火工品的传爆能力具有高置信水平的高可靠度时, 就需要对大批的火工品进行破坏性的发火检验, 这样在人力、物力和财力上造成很大的浪费。因此, 迫切地需要一套实用的工程计算方法来辅助通常的经验设计方法以提高设计工作的效率和效益。

雷管、传爆管等有金属壳底的火工品, 其起爆能力主要包括三个因素: 冲击波、破片和爆炸产物。爆炸时产生的冲击波在经过壳底和与受主炸药之间的间隙时会有所衰减; 而由火工品底壳形成的飞片则在间隙里得到加速, 当底壳撞击到受主炸药时, 相当于一个方形冲击波作用于受主炸药; 对爆炸产物的作用可分为两部分: 一部分是膨胀作用, 产生对底壳的推动力使之加速; 另一部分是热作用, 因传热时间较长, 而引爆过程时间很短, 故可以忽略。因此, 当火工品与受主炸药之间存在较大的间隙时, 决定火工品起爆能力的主要因素是火工品底部的破片。本文就飞片撞击引爆炸药做些工程计算方法方面的初步研究。

在下面的讨论中, 带下标  $e$  的字母是描述炸药的; 带下标  $f$  的字母是描述飞片的; 不带下标的字母既描述炸药又可描述飞片。

## 2. 起爆阈值与飞片和炸药有关参数的关系

Walker 和 Walsley<sup>[1]</sup>提出了炸药受冲击起爆的阈值:

$$p^2\tau = k \quad (1)$$

式中,  $k$  ——取决于受主炸药成分、密度等的常数;  $p$  ——受主炸药受到的冲击压力;  $\tau$  ——受主炸药受到的冲击时间。

当  $p^2\tau$  大于阈值  $k$  时, 受主炸药百分之百被引爆; 而  $p^2\tau$  小于阈值  $k$  时, 则受主炸药不能可靠地被引爆。乘积  $p^2\tau$  和传入受主炸药里的单位面积能量  $w$  有关,

$$w = \frac{p^2\tau}{\rho_0 U} = \frac{p^2\tau}{R_e} \quad (2)$$

式中,  $\rho_0$  ——受主炸药的初始密度;  $U$  ——受主炸药中的冲击波波速;  $R_s$  ——受主炸药的波阻。

因为炸药的波阻随冲击压力的变化不大,所以(1)式实际上可认为是能量准则。

当有金属壳底的火工品爆炸后,底壳将成为飞片并以很高的速度撞击到受主炸药上。撞击时,飞片和受主炸药在撞击界面上相互接触,根据动量守恒定理,对飞片和炸药都有

$$p - p_0 = \rho_0 U(v - v_0) = R(v - v_0) \quad (3)$$

式中,  $v_0$  ——初始质点速度;  $v$  ——质点速度;  $R$  ——波阻;  $p$  ——压力;  $p_0$  ——初始压力;  $\rho_0$  ——初始密度。

计算中,速度取冲击波的传播方向为正。撞击前,飞片和炸药中的初始压力  $p_0$  和炸药中的初始质点速度  $v_0$  都为零。设飞片的撞击速度为  $v_f$ 。撞击后,在撞击界面两边,飞片和炸药的最终质点速度  $v$  和压力  $p$  都相同。所以有

$$p = R_s v = R_f (v_f - v) \quad (4)$$

式中,  $R_f$  ——飞片的波阻。

由式(4)可以得到

$$v = v_f \cdot \frac{1}{\gamma + 1} \quad (5)$$

式中,  $\gamma = R_s/R_f$

又因为受主炸药的受撞击时间  $\tau$  近似等于冲击波在飞片厚度上运动一个来回的时间,即

$$\tau = \frac{2l_f}{U_f} = \frac{2\rho_f l_f}{R_f} \quad (6)$$

式中,  $U_f$  ——飞片中的冲击波波速;  $\rho_f$  ——飞片材料的密度;  $l_f$  ——飞片的厚度。

这样,由式(4)~(6)可得到

$$p^2 \tau = \frac{2\rho_f l_f R_s \gamma m_f^2}{(\gamma + 1)^2} \quad (7)$$

至此,我们将起爆阈值准则中的  $p^2 \tau$  以飞片和受主炸药的有关参数来表示。由此可见,只要计算出飞片的撞击速度和  $R_s$ 、 $R_f$  值,就可求出  $p^2 \tau$  值。将此值与受主炸药的起爆阈值  $k$  进行比较,就可以评价在该种情况下,受主炸药被引爆的可能性。

### 3. 飞片速度和材料波阻的计算

#### 3.1 飞片速度的计算

由于通常的火工品的底壳很薄,其内炸药爆炸时加载其上的能量形式主要为动能。根据 Gurney 方法中的开三明治(Open Sandwich)模型(图1)来计算飞片的速度  $v_f$ :

$$v_f = \sqrt{2E} \left( \frac{1 + 5t + 4t^2}{3} \right)^{-1/2} \quad (8)$$

式中,  $t = \frac{m_f}{m_y}$ ,  $v_f$  ——飞片飞散速度;  $m_f$  ——飞片的质量;  $m_y$  ——炸药有效质量;  $\sqrt{2E}$  ——Gurney 常数。

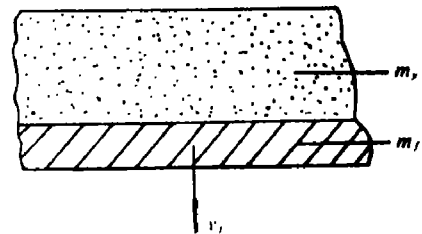


图1. 开三明治模型

Fig. 1. Opening sandwich model

上式是计算飞片在撞击受主炸药之前，经过足够的间隙加速后得到的速度。而当飞片和受主炸药间的间隙  $x$  比较小时(图 2)，飞片经间隙  $x$  撞击到受主炸药上的撞击速度  $v_f(x)$  和间隙  $x$  具有下列的函数关系：

$$v_f(x) = \sqrt{2E} \left( \frac{1 + 5t + 4t^2}{3} \right)^{-1/2} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{l_d + x}{l_d} \right)^{-(\alpha + \frac{1}{3}) \cdot (\alpha - 1)} \right\}^{1/2} \quad (9)$$

式中， $l_d$  —— 施主炸药药柱的高度； $\alpha$  —— 材料常数，其值通常在 1.3~3 之间。

但是实际应用中，火工品内的装药形态与模型中的装药形态是不一致的。为此在应用中要根据火工品的装药形态计算其有效药量。

对于很长的施主药柱，其边缘的稀疏损失效应使得远离飞片的炸药不能为加速飞片做贡献。对于裸装药柱，与边界线成  $30^\circ$  角以内的、高于  $h$  的炸药不能计入有效药量，应予以扣除(图 3)；对于有外壳包裹的药柱，则根据外壳的情况，折算角  $\theta$  将为小于  $30^\circ$  度角的某一角度<sup>[3]</sup>。

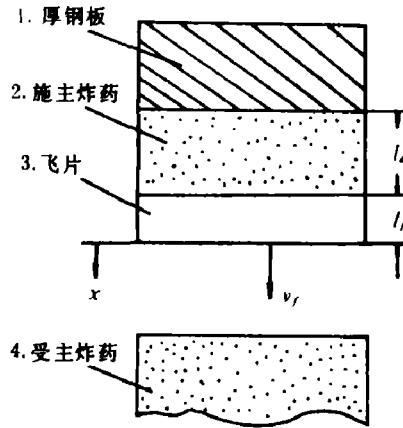


图 2 短间隙的传爆图

Fig. 2 Detonation transfer configuration for a short gap between the flyer and the acceptor.

- 1. Thick steel plate; 2. Donor charge;
- 3. Flyer; 4. Acceptor charge

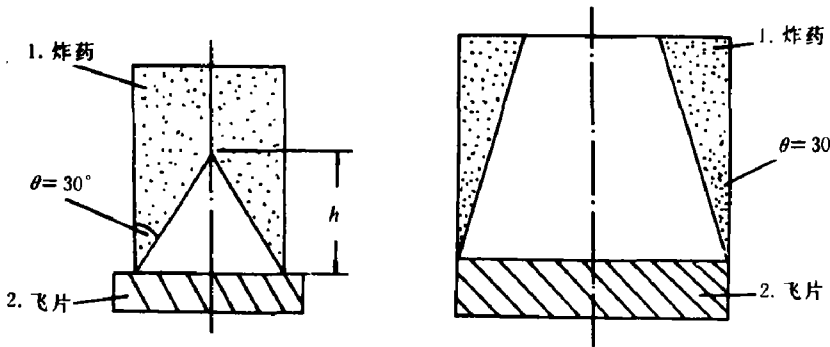


图 3 裸装药柱的折算角，有点的区域内炸药不计入有效药量

Fig. 3 Discounting angle for side losses from the bare charge. The Dotted region are not counted in calculating the effective charge.

- 1. Explosive charge; 2. Flyer

火工品通常是有外壳的，其径向稀疏波的特征速度最大值应与侧外壳的飞散速度相等。侧外壳的飞散速度  $v_c$  可由 Gurney 方法中的圆柱模型(Cylindrical Model)(图 4)计算

$$v_c = \frac{\sqrt{2E}}{\left( \frac{m_c}{m_f} + 0.5 \right)^{1/2}} \quad (10)$$

式中， $m_c$  —— 侧外壳的质量； $v_c$  —— 侧外壳飞散速度。

设带外壳装药系统和裸装药系统的折合角之比与径向产物的飞散速度之比成线性关系,即

$$\theta : 30^\circ = v_o : v_i \quad (11)$$

式中,  $\theta$  ——带外壳装药的折算角;  $v_o$  ——带外壳装药的径向产物飞散速度;  $v_i$  ——裸装药 ( $m_c=0$ ) 的径向产物飞散速度。

$v_o$  可由式(10)求得,  $v_i = \sqrt{2E}$ 。因此可由(11)式求得带外壳装药的折算角  $\theta$  为

$$\theta = 30^\circ \frac{v_o}{v_i} = 30^\circ \frac{1}{\sqrt{\frac{2m_c}{m_f} + 1}} \quad (12)$$

### 3.2 波阻的计算

假设在飞片和炸药中有线性贡献关系

$$U = c + sv \quad (13)$$

式中  $U, v$  ——介质中冲击波波速和质点速度;  $c, s$  ——材料常数。

则有

$$v = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ag}}{2a} \quad (14)$$

式中:

$$\begin{cases} a = \rho_o s_o - \rho_f s_f \\ b = 2\rho_f s_f v_f(x) + \rho_f s_f + \rho_o \\ g = \rho_f v_f(x) [c_f + s_f v_f(x)] \end{cases} \quad (15)$$

在计算飞片的波阻时,飞片中的质点速度应为  $[v_f(x) - v]$ 。飞片和受主炸药的波阻计算公式如下所示

$$\begin{cases} R_f = \rho_f U_f = \rho_f (c_f + s_f [v_f(x) - v]) \\ R_o = \rho_o U_o = \rho_o (c_o + s_o v) \end{cases} \quad (16)$$

### 4. 结束语

利用上述方法,我们成功地设计了引信中的一条传爆序列。计算结果和实验结果是吻合的。这种方法同时对火工品以及传爆序列的传爆可靠性研究具有很好的参考价值。

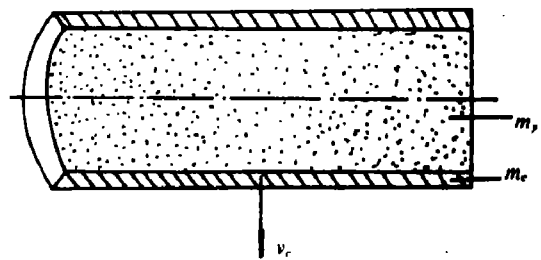


图4. 圆柱模型

Fig. 4 Cylindrical Model

### 参 考 文 献

- [1] Walker F E, Wasley R J. Critical Energy for Shock Initiation of Heterogeneous Explosive. Explosivstoff, 1969, 17(9)
- [2] Hery I G. The Gurney Formula and Related Approximations for High-Explosive Deployment of Fragments. Hughes Aircraft Rept PUB-189. 1967
- [3] Baum F A. Physics of an Explosion, Moscow: 1959, 386. (English translation from Fed. Clearinghouse, AD400151)
- [4] Donna P. Shock Sensitivity. A Property of Many Aspects. 5th Int Symp on Detonation, 1970

- [5] Chick M C. The Mechanism of Initiation of Composition - B by a Metal Jet. 7th Int Symp on Detonation, 1980
- [6] James H R . Critical Energy Criterion for the Initiation of Explosives by Spherical Projectiles. Propellant Explosives Pyrotechnics, 1989 ,14 (6)

## ENGINEERING CALCULATION OF THE INITIATION OF EXPLOSIVE BY A FLYER FOR BLASTING

Zhou Tiansheng      Chen Qingsheng

(*East China Institute of Technology, Nanjing 210007*)

**ABSTRACT** Engineering calculation method of the initiation of explosive by a flyer for blasting was studied in this paper. A set of formulae relative to evaluating the initiation possibility of explosives were given. The results were useful for design of blasting devices and explosive trains as well as the analysis of detonation transfer reliability.

**KEY WORDS** initiation, flyer, shock wave, explosive.