

炸药效率与起爆点位置间的关系

刘尔岩

本文初步解析分析了以金属惰层为边界的炸药推飞片的平面一维爆轰系统中，炸药起爆点的位置与炸药能量利用率之间的关系，并作了数值模拟计算，其结果与解析分析很好地一致，最后与瞬爆作了对比。

考虑一长为 l 的平面装药，两端分别放有质量为 M 和 M' 的金属飞层和惰层。设爆轰波在 O 点起爆，以稳定 CJ 爆轰的速度分别向两端传播（见图1）。为使问题简化，假设金属 M 和 M' 为刚体；爆轰产物满足多方指数的状态方程，且多方指数 $k=3$ ；爆轰波到达刚体内界面处的反射击波为弱击波，且认为穿过该弱反射击波特征线上的特征量维持不变。取起爆点 O 为 $x-t$ 图的坐标原点， l_1 及 l_2 分别为金属惰层 M' 和飞层 M 在横轴 x 上的绝对值。炸药与金属的相互作用根据界面处产物的不同状态可分为几个阶段。图1中 I 区为右行中心稀疏波区，III 区是速度为零声速等于 $D/2$ 的常数区^[1]。本文对 I、III 两区的邻区 II、IV 区分别给出做功表达式 \bar{W}_1 及 \bar{W}_2 。

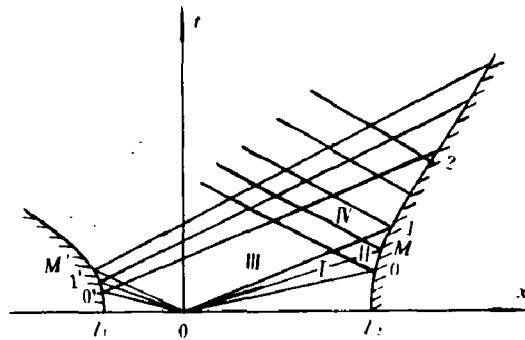


图 1

1. 求 \bar{W}_1 。

设图1中 II 区爆轰产物对飞层做功为 \bar{W}_1 ，其表达式推导如下：

正常爆轰波阵面上压力，声速及爆速分别为 P_j 、 c_j 及 D ，装药初始密度为 ρ_0 。 \bar{W}_1 不受左端边界条件的影响^[2]。在 II 区内有

$$u + c = \frac{x}{t} \quad p = p_j \left(\frac{c}{c_j} \right)^3 = B \left(\frac{x}{t} - u \right)^3 \quad B = \frac{16 \rho_0}{27 D} \quad (1)$$

对飞层 M 有

$$M \frac{du}{dt} = p \cdot S$$

式中 S 为刚体横截面积， M 为飞层质量。

$$\frac{du}{dt} = \frac{p \cdot S}{M} = \frac{\eta c^3}{Dl^2} \quad (2)$$

式中 $\eta = \frac{16 M_r}{27 M}$, $M_r = \rho_0 l_2 S$ 为起爆点右方炸药质量

微分(1)式得

$$\frac{du}{dt} = -\frac{c}{t} - \frac{dc}{dt} \quad (3)$$

(2)式代入(3)式得

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{c}{t} - \frac{\eta c^3}{Dl_2} \quad (4)$$

积分(4)式并利用初始条件

$$t_0 = \frac{l_2}{D} \quad x_0 = l_2, \quad c = D \quad (5)$$

得到:

$$x(t) = Dt \left[1 + \frac{1 - \sqrt{1 + 2\eta - \frac{2\eta l_2}{Dt}}}{\eta} \right] \quad (6)$$

$$u(t) = D \left[1 + \frac{\theta - 1}{\eta\theta} - \frac{l_2\theta}{Dt} \right] \quad (7)$$

式中

$$\theta = \left(1 + 2\eta - \frac{2\eta l_2}{Dt} \right)^{-1/2}$$

(6)式、(7)式适用的时间上限

$$t_1 = \frac{8l_2}{D(4-\eta)} \quad (8)$$

$$\text{则有 } \bar{W}_1 = \int_{x_0}^{x_1} p dx = B \int_{x_0}^{x_1} \left[\frac{x}{t} - u(t) \right]^3 dx = B \int_{t_0}^{t_1} \left[\frac{x(t)}{t} - u(t) \right]^3 u(t) dt \quad (9)$$

(6)式、(7)式及(8)式代入(9)式后, 积分得

$$\bar{W}_1 = \frac{9Bl_2D^3\eta}{32(\eta+2)^2} \quad (10)$$

2. 求 \bar{W}_2 .

图1中IV区爆轰产物对飞层做功为 \bar{W}_2 , 其表达式推导如下:

在IV区有

$$u + c = \frac{D}{2} \quad p = B \left(\frac{D}{2} - u \right)^3$$

对刚体运动有

$$\frac{du}{dt} = \frac{\eta}{Dl_2} \left(\frac{D}{2} - u \right)^3 \quad (11)$$

积分(11)式并利用

$$t_1 = \frac{8l_2}{D(4-\eta)}, \quad u_1 = D \left[1 + \frac{\theta(t_1) - 1}{\eta \theta(t_1)} - \frac{l_2 \theta(t_1)}{D t_1} \right]$$

得到

$$u(t) = \frac{D}{2} \left\{ \frac{D l_2}{2 \eta \left[t + \frac{16 l_2 (\eta^2 + 2)}{D \eta (4 - \eta)^2} \right]} \right\}^{1/2} \quad (12)$$

(12)式适用的时间上限

$$t_2 = \left[3 l_1 \left(\frac{\eta}{8 D l_2} \right)^{1/2} + \left(\frac{8 l_2}{D \eta} \right)^{1/2} \frac{(\eta + 2)}{(4 - \eta)} \right]^2 - \frac{16 l_2 (\eta^2 + 2)}{D \eta (4 - \eta)^2} \quad (13)$$

则有

$$\begin{aligned} \bar{W}_2 &= \int_{x_1}^{x_2} p dx = B \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{D}{2} - u(t) \right]^3 u(t) dt \\ &= \frac{\rho_0 l_2 D^2 \eta y (4 - \eta)^2 [(5 \eta + 4)(4 - \eta)y + 16(\eta + 2)]}{6(\eta + 2)^2 [3 \eta y (4 - \eta) + 8 \eta + 16]^2} \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $y = \frac{l_1}{l_2}$

3. 讨论。

$$(i) \quad \frac{d\bar{W}_1}{dl_2} > 0, \quad \lim_{l_2 \rightarrow \infty} \left(\frac{d\bar{W}_1}{dl_2} \right) \rightarrow 0 \quad (15)$$

$y = 0$ 时, 炸药对飞层第一阶段作功效率 ν_1 为

$$\nu_1 = \frac{\bar{W}_1 S}{Q M_{tot}} = \frac{8 \eta}{3(\eta + 2)^2}, \quad D^2 = 16Q$$

当 $\eta = 2$ 时, 有极值 $\nu_{1max} = \frac{1}{3}$ (16)

由上可见, \bar{W}_1 随 l_2 的增长而增加, 但当 l_2 增长到一定程度时, \bar{W}_1 随 l_2 的增长就不明显了。在外爆 ($y = 0$) 时, 当飞层重量为装药重量的 $8/27$ ($\eta = 2$), 第一阶段炸药能量利用率可达 $1/3$ 。

$$(ii) \quad \lim_{y \rightarrow 0} \bar{W}_2 = 0。$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \nu_2 = \frac{\bar{W}_2 S}{M_{tot} Q} = \frac{32g}{(9g + 4)^2}, \quad M_{tot} = \rho_0 S (l_1 + l_2)$$

当 $g = \frac{M}{M_{tot}} = \frac{4}{9}$, 有 $\nu_{2max} = \frac{2}{9}$ 。

即内爆 ($y \rightarrow \infty$) 时, 当飞层重量为装药重量的 $4/9$, 第二阶段炸药能量利用率可达 $2/9$ 。

(iii) 在装药中间某点起爆时, 前两个阶段的炸药能量利用效率是

$$\begin{aligned} \nu_{12} = \nu_1 + \nu_2 &= \frac{(\bar{W}_1 + \bar{W}_2) S}{Q M_{tot}} = 2g \left[\frac{3 \eta y (4 - \eta) + 12 \eta}{3 \eta y (4 - \eta) + 8 \eta + 16} \right]^2 \\ &= \frac{32M}{27 B l D} \left\{ \frac{y [108g(y + 1) - 16] + 108g(y + 1)}{y [108g(y + 1) - 16] + 72g(y + 1) + 243g^2(y + 1)^2} \right\}^2 \end{aligned} \quad (17)$$

(17)式对 y 求导有

$$\text{当 } M > \frac{4}{27} M_{\text{crit}} \text{ 时, } \gamma'_{1,2}(y) < 0.$$

即炸药效率 $\gamma_{1,2}$ 随 y 的增加单调下降。 $\gamma_{1,2}$ 随 g, y 的变化参数见附表。

(iv) 起爆位置 (y) 选定后, 则存在飞层重量与装药重量的最佳匹配。

将(17)式对 g 求导, 可求出 g 的极值点。即在此重量匹配下, $\gamma_{1,2}$ 可达最大值 (参见附表)。

上面仅对惰层内界面反射的反射波头到达飞层前阶段 ($t < t_2$) 作了解析分析。对后面阶段求解析解的困难在于要关联到惰层 M' 的运动规律。对于正常爆轰, 炸药能量集中聚集在爆轰波阵面及其附近^[1], 在某一固定时刻, 波阵面后的压力 p 随距离呈三次方下降, 炸药对飞层作功随时间衰减很快。除薄层装药外, 对大多数情况, 尤其是 η 较大飞层较薄的系统, 前两个阶段的解析分析, 将有助于对物理图象的基本了解。

4. 瞬爆

设想整个装药于 $t = 0$ 时刻同时起爆, 则有^[2]

$$c_0 = 0.613 D, \quad p_0 = \frac{\rho_0 D^2}{8}$$

参见图 2, 两端刚体运动引起的扰动波头在常数区以 c_0 传播。对简单波区 (I) 有

$$u + c = c_0 \quad (18)$$

代入刚体 M 运动方程

$$\frac{du}{dt} = \frac{p_0 S}{M} \left(1 - \frac{u}{c_0}\right)^3 \quad (19)$$

积分(19)式并利用

$$t = 0 \text{ 时, } u = 0, \quad x = l$$

就得到

$$x = l + c_0 t + 3 g l \left[1 - \left(1 + \frac{2t}{3 g t_0}\right)^{1/2} \right] \quad (20)$$

(20)式的适用上限

$$t_1 = \left(1 + \frac{1}{6g}\right) t_0 \quad (21)$$

炸药左端产生的稀疏波头到达右端飞层 M 内界面前总作功

$$\bar{W} = \frac{1}{2} M u^2(t_1) = \frac{3}{16} M D^2 \left\{ 1 - \frac{3g}{\sqrt{9g^2 + 6g + 1}} \right\}^2 \quad (22)$$

$$\gamma' = \frac{\bar{W}}{E_{\text{tot}}} = 3g \left[1 - \frac{3g}{\sqrt{9g^2 + 6g + 1}} \right]^2 \quad (23)$$

$$g = \frac{1}{3} \text{ 时, } \gamma'_{\text{max}} = \frac{1}{4}.$$

(23)式数值计算结果如下

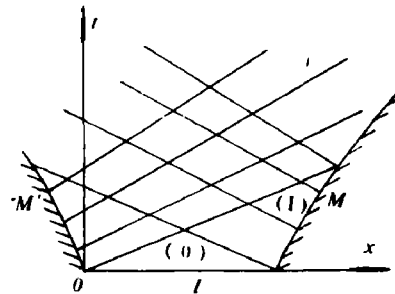


图 2

g	0.2	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5
γ'	0.2344	0.240	0.2076	0.1875	0.1701	0.1488

可见, 瞬爆极值非常接近由中间起爆的 ($y=1$) 正常爆轰结果

5. 数值计算

用一维程序进行了数值模拟计算。模型及数值结果参见图3。内爆、外爆及瞬爆情况下, 炸药对飞层做功随时间的增长曲线间的关系与解析分析很好地一致。

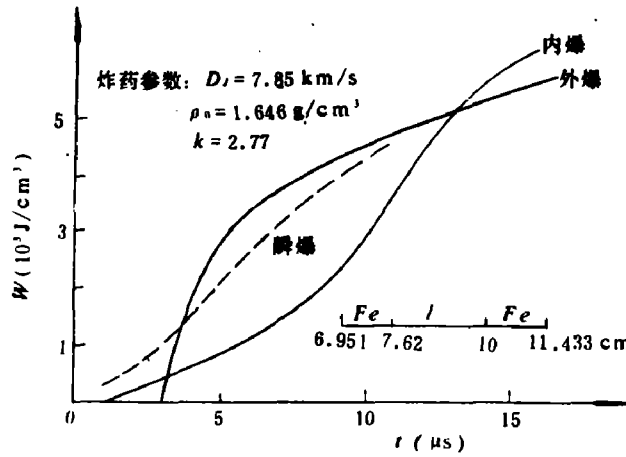



图 3

综上所述, 对某一确定爆轰系统, 为了最有效地利用炸药能量, 应根据所需要的飞层飞行距离 (或时间) 选用不同的起爆位置。当飞层飞行距离不长时, 外爆优于内爆, 因为爆轰能量集中聚集在爆轰波阵面附近 (参见图3); 而当飞层飞行距离较长时, 在某些系统中, 内爆优于外爆, 这主要是因为内爆时飞层与炸药界面上的压力衰减较外爆要慢; 当飞层飞行时间 t 足够长时, 在满足 $M > \frac{4}{27} M_{roi}$ 的爆轰系统中, 外爆优于内爆; 瞬爆极其接近由中间起爆的正常爆轰情况。

附表 $\gamma_{1,2}$ 随 (g, y) 的变化

y	g	0.08	0.10	0.15	0.20	0.333	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5
0.001	$\gamma_{1,2}$	0.2232	0.2514	0.2973	0.3205	0.3319	0.3113	0.2629	0.2350	0.2116	0.1836
0.05		0.2215	0.2464	0.2878	0.3091	0.3209	0.3034	0.2569	0.2305	0.2081	0.1810
0.1		0.2190	0.2409	0.2787	0.2987	0.3110	0.2949	0.2522	0.2265	0.2050	0.1787
0.5		0.2037	0.2182	0.2487	0.2674	0.2826	0.2721	0.2374	0.2153	0.1961	0.1723

续 表

 γ	0.08	0.01	0.15	0.20	0.333	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5
0.5	0.1857	0.1984	0.2278	0.2465	0.2652	0.2579	0.2287	0.2085	0.1907	0.1682
0.7	0.1698	0.1831	0.2133	0.2332	0.2538	0.2494	0.2229	0.2041	0.1872	0.1655
1.0	0.1523	0.1675	0.1993	0.2200	0.2430	0.2418	0.2174	0.2001	0.1838	0.1630
1.2	0.1444	0.1605	0.1931	0.2143	0.2383	0.2380	0.2152	0.1982	0.1820	0.1618
1.5	0.1362	0.1533	0.1867	0.2086	0.2333	0.2342	0.2124	0.1953	0.1806	0.1607
2.0	0.1282	0.1462	0.1803	0.2020	0.2283	0.2295	0.2099	0.1934	0.1790	0.1595
5.0	0.1174	0.1358	0.1704	0.1925	0.2202	0.2238	0.2057	0.1906	0.1762	0.1574
10.0	0.1155	0.1340	0.1685	0.1906	0.2184	0.2219	0.2048	0.1897	0.1758	0.1569
50.0	0.1149	0.1333	0.1677	0.1903	0.2177	0.2215	0.2040	0.1894	0.1753	0.1567
100.0	0.1149	0.1333	0.1677	0.1902	0.2177	0.2215	0.2040	0.1893	0.1752	0.1567
500.0	0.1149	0.1333	0.1677	0.1902	0.2177	0.2214	0.2040	0.1893	0.1753	0.1567
1000.0	0.1149	0.1333	0.1677	0.1902	0.2177	0.2214	0.2040	0.1893	0.1753	0.1567
5000.0	0.1149	0.1333	0.1677	0.1902	0.2177	0.2214	0.2040	0.1893	0.1753	0.1567

参 考 文 献

- [1] 鲍姆, $\Phi. A.$, 等, (众智译), 爆炸物理学, 科学出版社 (1963).
 [2] 爆轰理论, 应用物理与计算数学研究所 (内部资料), (1964).

RELATION BETWEEN THE POSITION OF INITIATION POINT AND THE EFFICIENCY OF EXPLOSIVE

Liu Eryan

Abstract

In this paper, a relation between the position of the initiation point and the efficiency of explosive is studied for a system of plane-wave detonation with a plate of metal at each ends (one of them is the flyer). Numerical results are provided, and the agreement with analytical results is satisfactory.