

# 炸药爆轰产物流场的分析及实验研究

赵衡阳

(1983年1月10日收到)

分析了电磁速度传感器(EMVG)在半无限长一维装药中和有限长一维装药中,受平面一维爆轰波作用下的运动过程;论述了用EMVG来研究爆轰产物流场规律的基本原理和方法;报导了一些初步的试验结果,这些结果与理论分析结果比较一致。

## 引言

在两年多来用电磁法实验研究爆轰的过程中,我们发现,电磁速度传感器(EMVG)所获得的信息量是其它爆轰测试方法(诸如自由表面速度法、水箱法、压阻法等)所不能比拟的。然而在以往的工作中却没有充分地研究和利用这些很宝贵的信息,这是很可惜的。

EMVG是一种嵌入材料内的拉格朗日量计,它可以做得足够薄,以致它的质量和惯性可以忽略,即可以认为它和爆轰产物粒子一起运动。只要我们合理设计传感器的形式(组合形式)和布点,就可以获得爆轰产物全流场的信息。由于传感器跟踪产物粒子运动,我们就可以获得各爆轰产物粒子速度剖面 $u = u(t)$ ,继而也能确定各产物粒子的运动轨迹 $x = x(t)$ ,这样就可以获得爆轰产物全流场信息

在分析我们的 $u = u(t)$ 剖面(由感应电势 $e$ 随时间 $t$ 记录波形换算得到)中,我们发现,爆轰波后,台劳波衰减区的流动规律是一个很吸引人的问题。在一定程度上能反映出反应流的某些细观的变化。而这些细观变化的研究无疑是有很大现实意义的。例如含铝炸药能量贡献时机,混合炸药反应机理(历程)以及爆轰产物状态方程的实验研究方面均可以用EMVG这种测试手段来进行。

Dremin<sup>(1)</sup>曾用这种手段来研究过含铝炸药和一般炸药不同的能量释放时机;Edwards等人<sup>(2)(3)</sup>比较科学地利用不同装药长度所测的台劳波衰减线成对比法来确定C-J点位置;Davis<sup>(4)</sup>成功地测定了不同装药长度的PBX 9404的台劳波衰减线。这些工作都是很有意义的。我们在此基础上作了一些产物流场的分析,并结合现有水平的测试条件进行了部分实验研究,看来这种手段对我们研究反应流细观变化还是比较有效的。

## EMVG 运动规律分析

爆轰产物粒子的运动规律是通过EMVG反映出来的,所以我们首先分析嵌入炸药内的

EMVG在爆轰波作用下的运动规律,具体结构见图1。由于传感元件是极薄的金属箔,其质量和惯性可以忽略,于是可以认为传感器是跟踪产物粒子运动的(拉格朗日量计)。传感器的运动规律也就是当地产物粒子的运动规律。

由爆轰产物一维流动理论可知,对右传简单波区,产物质点运动速度满足如下关系式:

$$u = \frac{2}{\gamma + 1} \frac{x}{t} - \frac{D}{\gamma + 1} \quad (1)$$

对跟踪产物粒子的EMVG来说,它的运动速度

$$\left( \frac{dx}{dt} \right)_h = u = \frac{2}{\gamma + 1} \left( \frac{x}{t} \right) - \frac{D}{\gamma + 1} \quad (2)$$

这里的下标  $h$  为拉格朗日坐标。解方程(2)即得传感器(或该截面爆轰产物粒子)的运动迹线和速度

$$x = \frac{Dt}{\gamma - 1} \left[ \gamma \left( \frac{t}{t_R} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}} - 1 \right] \quad (3)$$

$$u = \frac{D}{\gamma - 1} \left[ \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \left( \frac{t}{t_R} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}} - 1 \right] \quad (4)$$

其中  $t_R = R/D$ 。

对压装TNT炸药,密度  $1.6\text{g/cm}^3$ ,  $R = 20\text{mm}$ , 爆速  $D = 6.91\text{mm}/\mu\text{s}$ , 当  $\gamma = 2.9, 3.0, 3.3$  三种情况下算得的传感器运动速度衰减规律,即  $u \sim t/t_R$  分布图见图2所示。

用EMVG嵌入上述条件的装药中进行试验,实测得到传感器运动速度衰减规律( $u-t$ 曲线)的五条波形曲线见图3所示。其中虚线为(4)式计算的结果。实测的衰减线除了  $26^\circ\Pi$  以外均高于理论计算线,也就是说实测衰减速率比理论计算的要小些,衰减得要慢些。这是在我们意料之中的。原因是在计算中没有考虑引爆面前还有一个平面波发生器,轴向稀疏

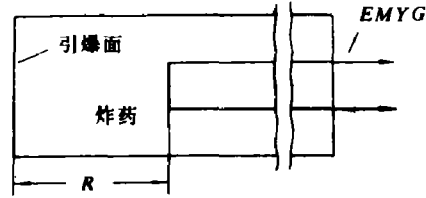


图1 装药结构示意图

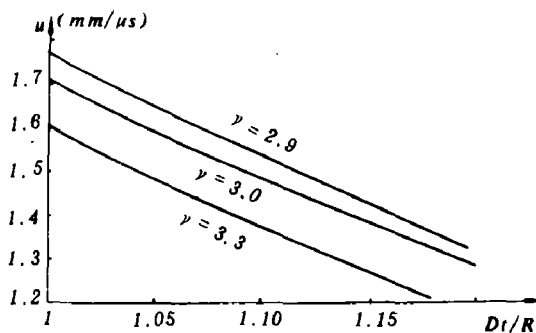


图2 传感器速度衰减规律

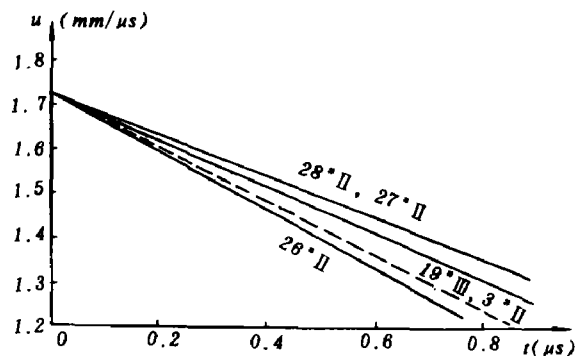


图3 实测和计算  $u-t$  波形比较图

波影响较早，衰减就快。而实际试验中由于有平面波发生器，相当于引爆面提前，加长了引爆面到传感器的距离  $R$ ，轴向稀疏波影响较晚，衰减就慢一些。

### 自由面对传感器运动的影响

以上讨论的是半无限长药柱中传感器受爆轰作用下的运动规律。但在有些实验中，传感器敏感部分离药柱底端面距离是很短的，象音速测量中，这个距离只有  $2 \sim 5 \text{ mm}$ 。在这种情况下，要考虑自由面传入的稀疏波使传感器的加速，即要考虑有限长装药图案（见图4所示）。当爆轰波到达自由面  $l$  处时，即传入爆轰产物一个稀疏波。这个稀疏波与传感器在  $x$  处相遇，当  $\gamma = 3$  时，相遇的时间  $t_x$  由下列等式来确定：

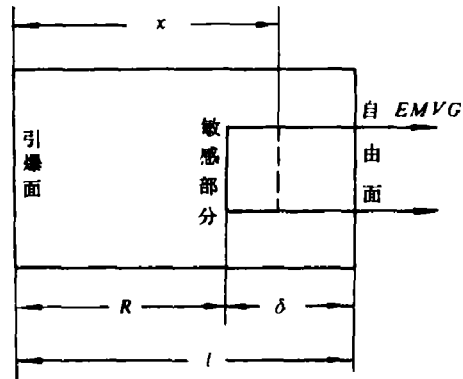


图4 右端面为自由面时的情况

$$x = \frac{Dt_x}{2} \left[ 3 \left( \frac{t_x}{t_x} \right)^{-1/2} - 1 \right] = l - \frac{D}{2} \left( t_x - \frac{l}{D} \right) \quad (5)$$

由(5)式解得

$$t_x = \frac{l^2}{RD} \quad \text{或} \quad t^* = t_x - \frac{R}{D} = \frac{\delta}{D} \left( 2 + \frac{\delta}{R} \right) \quad (6)$$

这里  $t^*$  为传感器开始运动到受稀疏波作用而突然加速的时间。在  $t^*$  以后，传感器处于复合区流场之内，其传感器运动微分方程在  $\gamma = 3$  时有如下形式：

$$\left( \frac{\partial x}{\partial t} \right)_h = u = \frac{x}{2t} - \frac{x-l}{2(t-(l/D))} \quad (7)$$

(7)式的解为

$$x = Dt \left[ 1 - \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{R}{l} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{l}{Dt} \right)^{1/2} \right] \quad (8)$$

并得

$$u = \frac{D}{2} \left[ 1 - \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{R}{l} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{l}{Dt} \right)^{1/2} \right] \left( \frac{1}{t} + \frac{1}{t-(l/D)} \right) - \frac{l}{2(t-(l/D))} \quad (9)$$

为了对比计算和实验结果符合程度，我们采用如下试验条件

$$R = 19.9 \text{ mm}, \delta = 4.7 \text{ mm}, l = 24.6 \text{ mm}, D = 6.91 \text{ mm}/\mu\text{s}。$$

由(6)计算得到传感器加速时间为

$$t_x = l^2/RD = 4.40 \mu\text{s} \quad \text{或} \quad t^* = 1.52 \mu\text{s}$$

即在传感器开始运动后  $1.52 \mu\text{s}$  时加速运动，感应电势值突然升高。

实验测定传感器在运动后  $1.50 \mu\text{s}$  处出现突然加速。理论计算和实验测定值比较接近。

正如前面所述,理论计算时,把引爆面取在平面波发生器和加载药柱界面上,而实际情况要复杂得多。平面波发生器的一部分药量应当折合到装药长度  $l$  中去;而平面波发生器引爆加载药柱时不能立即形成稳态爆轰。若要考虑这两个因素,可以在理论计算时,确定一个虚拟引爆面,最后由实验来验证。

理论计算的传感器在流场中运动迹线( $x-t$ 图)见图5所示。从图5看出,传感器在  $t_R < t < t^*$  时间内是减速的,其规律符合台劳波衰减过程。而在  $t > t^*$  时,由于反射稀疏波到达传感器,使传感器加速。

设置在离引爆面不同距离处的传感器,其运动速度变化规律是不同的。图6画出了离引爆面三种不同距离,即  $R = 20, 25, 30\text{mm}$  处所设置的传感器速度变化的理论曲线。

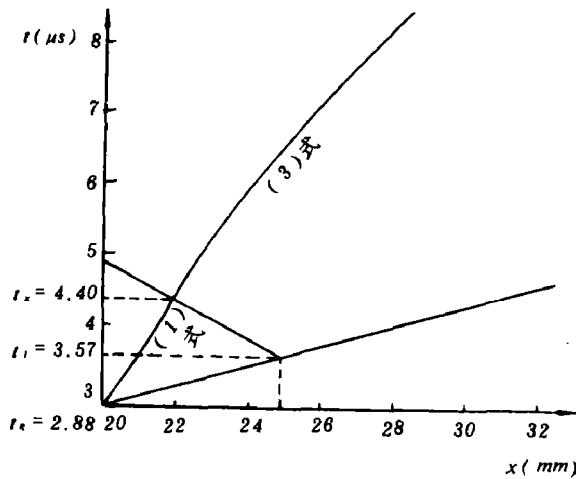


图5 传感器在全流场中运动迹线图

$$(1) \text{式: } x = (R \bar{t}_R / 2) (3 \bar{t}_R^{-1/2} - 1)$$

$$(3) \text{式: } x = l \bar{t}_i \left( 1 - \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{R}{l} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{l}{\bar{t}_i} \right)^{1/2} \right)$$

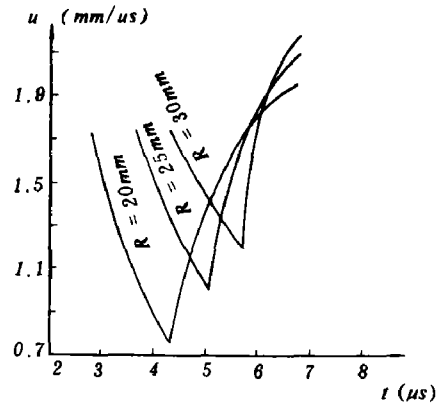


图6 不同  $R$  处传感器运动速度规律

从图6看出,加载药柱越厚( $R$ 越长)传感器速度衰减越慢,这是因为引爆端轴向稀疏波对传感器速度影响较晚,但末端自由面进入的稀疏波却能使传感器较快地加速。

### 虚拟引爆面的确定

我们曾试图用测定  $t^*$  的方法来反推确定虚拟引爆面位置。虽然在  $R = 20\text{mm}$  情况下,  $R$  大小对  $t^*$  影响不敏感。但只要  $t^*$  测定足够准确,用此法确定虚拟引爆面还是可行的。

根据我们实测  $t^* = 1.50\mu\text{s}$  计算,虚拟引爆面位置  $R$  为  $23\text{mm}$ 。比平面波发生器和加载药柱界面稍提前一点(见图7)。

$t^*$  随  $R$  增加而减小的程度在不同  $R$  时

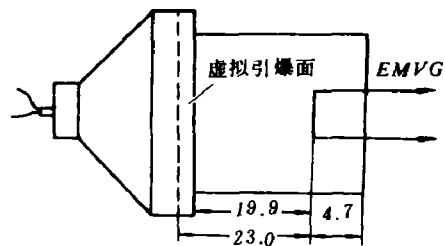


图7 由  $t^*$  反推虚拟引爆面位置

是不同的，见图8所示。当R较小时( $R < 20mm$ 时)  $t^*$ 随R变化很敏感。

我们把(6)式对R求导，得

$$\frac{\partial t^*}{\partial R} = -\frac{\delta^2}{DR^2} \quad (10)$$

从中可以看出，在R很小时， $t^*$ 随R变化是很敏感的。由此我们完全有理由可以期望用这种方法来确定理论计算的初值条件——虚拟引爆面的位置。

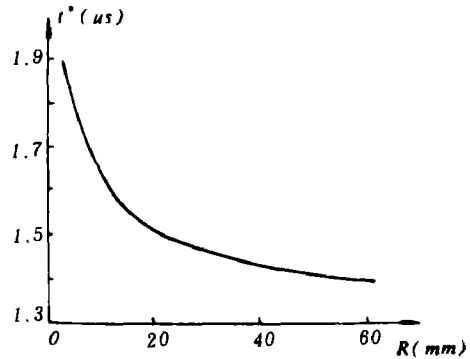


图8 不同R下稀疏波到达传感器的时间

### 爆轰产物音速测定

利用EMVG是可以测定爆轰产物音速的。众所周知，反射稀疏波是以爆轰产物当地音速行进的。当爆轰达到自由界面时，从界面反射回爆轰产物的稀疏波波速即为  $u - c$ 。只要把传感器开始运动到稀疏波返回到达传感器的时间  $t^*$  测出来，就可以测出爆轰产物在  $\delta$  距离内的平均音速

$$t^* = \frac{\delta}{D} + \frac{-(\delta - \bar{u}t^*)}{\bar{u} - \bar{C}} \quad (11)$$

或

$$\bar{C} = \bar{u} + \frac{\delta - \bar{u}t^*}{t^* - \delta/D} \quad (12)$$

这里  $\bar{C}$  是在  $\delta$  距离内爆轰产物的平均音速； $\bar{u}$  是  $\delta$  距离内平均质点速度。

(11)式中  $\bar{u}t^*$  即为传感器在  $t^*$  时间内所运动的距离  $x^*$  (见图9)

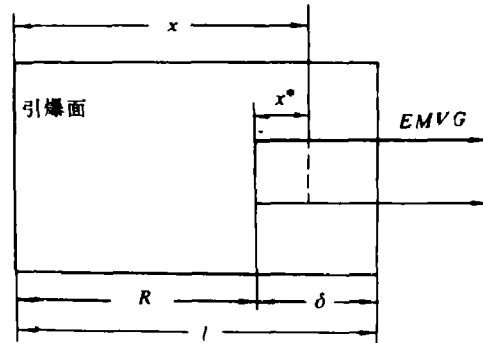


图9 音速测量原理图

$$x^* = x - R = \frac{Dt^*}{t_R} \left[ 3 \left( \frac{t^*}{t_R} \right)^{-1/2} - 1 \right] - R \quad (13)$$

化简得

$$x^* = \frac{l}{2} \left( 3 - \frac{l}{R} \right) - R \quad (14)$$

$\bar{u}$  可由实测  $u - t$  曲线求得，即

$$\bar{u} = \frac{\int_0^{t^*} u(t) dt}{t^*} \quad (15)$$

这样，我们得到音速  $\bar{C}$  的计算式

$$\bar{C} = \frac{\int_0^{t^*} u(t) dt}{t^*} + \frac{(l/2)(l/R) - l}{t^* - \delta/D} \quad (16)$$

从(16)式可以看出,只要测出 $u(t)$ 线和反射稀疏波到达传感器的时间 $t^*$ ,就可以算出爆轰产物在 $\delta$ 距离内的平均音速 $\bar{C}$ 。

对于我们装药结构的情况下,即 $l = 24.6\text{mm}$ ,  $R = 19.9\text{mm}$ ,  $\delta = 4.7\text{mm}$ ,  $D = 6.91\text{mm}/\mu\text{s}$

测得 $t^* = 1.50\ \mu\text{s}$ ,  $\frac{\int_0^{t^*} u(t)dt}{t^*} = 1.3\text{mm}/\mu\text{s}$ , 则计算得 $\bar{C} = 4.93\text{mm}/\mu\text{s}$ 。

若要使平均音速 $\bar{C}$ 更接近于C-J音速 $C_{CJ}$ ,传感器设置应尽可能接近自由面,即厚度 $\delta$ 尽可能地减小。

谢锋、吴林桂同学参加了本工作部分试验;梁云明同志在理论分析方面作了不少帮助,特此感谢。

### 参 考 文 献

- (1) Dremin, A. N., 8th Symp. On Combustion (1962), 610.
- (2) Edwards, D. J. et al, AD-749007(1972).
- (3) Edwards, D. J. et al, AD-749330(1972).
- (4) Davis, W. C., ADA 059120(1976), 637.

## ANALYSIS AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF DETONATION PRODUCT FLOW

Zhao Hengyang

### Abstract

The motion process of the Electro-Magnetic Velocity Gage (EMVG) subjected to plane detonation waves has been analyzed for one dimensional explosive charge with semi-infinite and finite lengths. The principle and method are described for applying EMVG to the research of the detonation product flow, and some preliminary experimental results are reported, which are in accord with those from theoretical calculation.