

化爆引起的电磁辐射^{*}

陈生玉 孙新利 钱世平 韦荫康
(第二炮兵工程学院 西安市 710025)

摘要 对带金属壳装药爆炸产生的电磁辐射进行了一系列实验研究。运用量纲分析方法,初步给出了电磁辐射与爆炸动力学参量之间的关系。

关键词 化爆 电磁辐射 量纲分析

中图法分类号 O 389 O 441.5

1 引言

H. T r i n k s 于 1978年公布了实验观察到的一些电磁脉冲图^[1],这些图分别是高能炸药爆炸破坏其装药壳体期间、炮弹出膛的一刹那抛射体或飞片碰靶期间产生的电磁辐射。此后, Y. A. J V a n 和 A. P. B o r o n i n 分别做过一些类似实验^[2-3],得到类似的示波图,证明化爆时确实伴随有较强的电磁辐射。我们对这一现象极为关注,做了进一步的实验研究。

为了弄清电磁辐射的起因,我们首先进行了一系列考察性实验。这些实验包括:通过屏蔽电缆给电雷管供电时,热桥丝发出的电磁辐射测量;电雷管爆炸时产生的电磁辐射测量;雷管、传爆药和带金属壳的主装药爆炸时的电磁辐射测量。通过这一系列由简单到复杂的摸底实验,使我们能从化爆实验示波图中清楚辨别各个电磁辐射脉冲的起因、出现时刻和最大幅值。

在此基础上,我们拟定了实验方案,进行了一系列带壳装药爆炸引起的电磁辐射测量实验。由于化爆引起的电磁辐射受很多因素的影响,如装药是否具有金属壳、装药质量、装填比、装药方式与类型等,都会影响电磁辐射的强度与波形。因此,在不同条件下,其信号特征和幅度不同。由于这一现象的复杂性,目前研究还处于探索性阶段。我们试图给出一个实验关系式来描述爆炸动力学参量与其电磁辐射之间的关系。

2 实验原理

对于带壳装药爆炸产生的电磁脉冲,在装药类型和形状一定的情况下,可以推测这一物理现象与爆炸动力学参量和电场参量有关,即电场强度 E 与装药质量 m 、爆速 D 、壳体质量 M 、空气介电常数 ϵ 接收天线离爆点的距离 r 以及时间 t 相关。

众所周知,在炸药爆轰的初始时间,金属壳受爆炸高温高压冲击,会发生变形、向外扩展、产生裂纹和裂缝,爆炸的气体产物与固体产物将从裂缝中喷出。由于电动效应和爆炸产物与破坏壳体的摩擦,使电荷发生分离,超前的气体爆炸产物与落后的固体爆炸产物带

* 1996-07-04收到原稿,1996-11-27收到修改稿。

有不同符号的电荷,加之冲击波从地面反射引起电荷的不对称性,因此气体和固体爆炸产物电荷在空间形成有效的电偶极子。初始时刻,随着气体产物离开固体产物的距离的增大,偶极矩的臂长增大,当它们之间的距离最大时,偶极矩最大。随后,固体爆炸产物追赶气体爆炸产物,当赶上时,偶极矩臂长变为零,电脉冲符号发生改变。与此同时,完全破坏成金属破片的壳体开始飞散。依据破片的飞散速度,破片能赶上气体产物,再赶超固体产物,或者先赶上还未超过气体产物的固体产物,然后赶上固体产物。总之,由于带电气体产物、带电固体产物以及带电破片,各自的速度变化及大小不同,存在着互相竞赛的追赶过程,从而形成了一个变化的电磁脉冲辐射。

依据上述分析可知,在装药类型、形状、爆点离地面的高度以及接受天线系统一定的条件下,影响爆炸电磁辐射的主要动力学参量是速度。文献 [1] 指出,爆炸动力学参量近似满足下面的自模条件

$$v(\frac{t}{m}) = v(\frac{t}{m})$$

式中: t 为特征时间, $t \propto m^{1/3}$, m 为装药量。文献 [2] 通过实验研究给出气体爆炸产物速度 $u(t)$ 、爆炸产物中固体粒子速度 $v(t)$ 、壳体破片速度 u 的关系式

$$u(t) = \frac{dR(t)}{dt} \quad (1)$$

$$v(t) = u(0) \exp(-Bt) + B \exp[-B \int_0^t u(t) e^{Bt} dt] \quad (2)$$

$$u = \frac{D}{2} \left[\frac{1}{2U_+ - 1} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^4 \right] \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中:

$$R(t) = 1 + 4.6 \times 10^4 t - 0.57 \times 10^8 t^2 + 3.3 \times 10^{10} t^3 - 10^{13} t^4 + 1.2 \times 10^{15} t^5$$

$$B = \frac{9}{5} \frac{Z}{a^2 d} m^{1/3}, \quad U_+ = \frac{M_c}{m}$$

$R(t)$ 是气体爆炸产物与壳体接触面半径,在良好的近似条件下,(1)式是成立的, $u(0)$ 是初始时刻气体爆炸产物的速度。在 B 的表达式中, a 为固体粒子半径, d 为粒子密度, Z 为粘性系数,对于凝聚炸药来说, $2 \mu m \leq a \leq 5 \mu m$, $d \approx 2 g/cm^3$, $\eta \approx 1 \times 10^3 g/(cm \cdot s)$,当装药质量 m 给定后, B 约为一常数。在 (3) 式中, r_0 为装药半径, r 为装药壳体在爆炸作用下极限膨胀半径,若忽略小量 $(r_0/r)^4$, (3) 式变成

$$u \approx \frac{D}{2} \left(\frac{1}{2U_+ - 1} \right)^{1/2} \quad (4)$$

通过以上论述可以看出,在研究带壳装药产生的电磁脉冲时,由于存在上述关系式,因此只要考虑了参量 m 、 M_c 、 B 和 D ,就等价于考虑了 $u(t)$ 、 $v(t)$ 和 u

另外,在电学上有关系式

$$E = \frac{q}{4\pi X^2} \quad (5)$$

因此,若考虑了电场强度 E 、空气电介质常数 X 和天线离爆心的距离 r ,就没有必要考虑电量 q

综上所述,对于带壳装药爆炸产生的电磁脉冲问题,涉及的量纲变量及其量纲为:

装药质量	m	$[m] = M$	装药爆速	D	$[D] = LT^{-1}$
壳体质量	M_c	$[M_c] = M$	电场强度	E	$[E] = LM T^{-3} I^{-1}$
特征时间	f	$[f] = M^{-1/3} T$	介电常数	X	$[X] = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$
粘性参量	B	$[B] = M^{1/3} T^{-1}$	天线距离	r	$[r] = L$

根据量纲分析,这一组量纲变量之间,必定存在一个支配这个物理现象的函数关系式,若以隐函数形式表示,即

$$f(E, m, M_c, D, X, r, f, B) = 0 \quad (6)$$

按 π 定理可得到四个无量纲变量,它们之间有下面的函数关系

$$J \left[\left[\frac{X^3}{m} \right]^{1/2} \frac{E}{D}, \frac{D f m^{1/3}}{r}, U, B, f \right] = 0$$

或者

$$E = D \left[\frac{m}{X^3} \right]^{1/2} F \left[\frac{D f m^{1/3}}{r}, U, B, f \right] \quad (7)$$

(7)式等价于(6)式。如果不考虑气体粘性的影响,即不考虑爆炸产物中固体带电粒子的影响,只考虑带电破片的影响,那么(7)式变成

$$E = D \left[\frac{m}{X^3} \right]^{1/2} F \left[\frac{D f m^{1/3}}{r}, U \right] \quad (8)$$

若不考虑带电破片的影响,只考虑爆炸产物中固体带电粒子的影响,(7)式变成

$$E = D \left[\frac{m}{X^3} \right]^{1/2} F \left[\frac{D f m^{1/3}}{r}, B, f \right] \quad (9)$$

3 实验结果与分析

正式有效试验共 12 发。装药为圆柱形铸装 B 炸药,爆速为 7840 m/s,其高度与直径比为 2:1,装药外壳为预制钢球破片,爆点离地面高 15 cm,接收天线有两种,分别为长 25 cm、直径 2 mm 和长 100 cm、直径 10 mm 的铜杆天线。采用 100 Hz 的 2230 记忆贮存示波器记录电磁信号,全部测试结果存入计算机磁盘。根据波形数据分别得到长、短直杆天线测试结果,如表 1 和表 2 所示。

表中最大幅值 E 为示波图的最大峰值,出现时间指最大峰值对应的时间。应该指出,示波器记录的电磁脉冲信号与实际的爆炸辐射场强之间有一个比例常数 T ,可通过信号标定得到:首先对示波器记录的电磁脉冲信号进行频谱分析,依据所得频谱选择合适的射频信号发生器;其次在接收系统及位置不变的情况下,将信号发生器放在爆点处,使其发出已知峰值的电磁脉冲信号,用原系统天线接收已知信号并在示波器上记录;最后将已知信号峰值与示波图的电磁脉冲峰值相比即得常数 T 。对不同的爆炸装置和测试系统, T 是不同的。我们最关心的是电磁辐射场强与爆炸动力学参量之间的关系,故不考虑 T 下面的 E 值及其估算值 E 均对应于示波图上最大电磁脉冲峰值。

目前,还不能从理论上推导出(7)式的具体形式,下面我们分别依据表 1 和表 2 的数据,运用逐步回归分析方法导出(7)式的具体形式。各系数取值为 $\alpha = 3.5 \mu m$; $\beta = 2 g/cm^3$; $\gamma = 10^3 g/(cm \cdot s)$; $X = 1.0005$

表 1 短直天线

Table 1 By use of a short straight antenna

实验号	最大幅值 $E / (\text{mV} / \text{km})$	出现时间 $t / \mu\text{s}$	壳质量 M_c / g	药质量 m / g	测量距离 r / km
1	166	900	11.13	8.837	1
2	178	896	11.13	8.837	1
3	168	990	13.70	8.946	1
4	174	452	16.67	9.269	1
5	216	770	16.67	9.269	1
6	203	1502	26.81	21.341	1
7	186	1332	32.46	21.169	1

表 2 长直天线

Table 2 By use of a long straight antenna

实验号	最大幅值 $E / (\text{mV} / \text{km})$	出现时间 $t / \mu\text{s}$	壳质量 M_c / g	药质量 m / g	测量距离 r / km
8	189	1476	39.52	21.973	2
9	244	1448	52.38	41.694	2
10	131	378	63.41	41.407	1
11	237	1400	63.41	41.407	2
12	152	576	77.19	42.918	2

令

$$x_1 = D \left(\frac{m}{X^3} \right)^{1/2}; \quad x_2 = \frac{D \cdot m^{1/3}}{r}; \quad x_3 = U; \quad x_4 = B \cdot f \quad (10)$$

则

$$E = x_1 F(x_2, x_3, x_4) = H(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (11)$$

式中: x_2, x_3, x_4 为无量纲量, x_1 为有量纲量, 其量纲与 E 相同, 函数 H 的量纲也与 E 相同。

利用级数展开, 一个函数可以用其多项展开式表示, 并达到相应的精度。首先, 将 $H(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 用多项展开式表示; 然后, 利用实验数据, 在最小二乘法原理下, 用逐步回归分析方法, 对展开式进行回归分析; 最后, 得到显著性检验值 F 和复相关系数 R 都较大, 且残差平方和 Q 较小的最优回归方程。由表 1 数据最后得到的回归方程为

$$\begin{aligned} E \approx & -187.2399052684 + 2.1622154598x_3^2x_4^2 - \\ & 0.6655682891x_2^3x_3 + 0.0372221169x_2^3x_4 + \\ & 0.3182486218x_1 + 25.8920310632x_2 \quad (\text{mV} / \text{km}) \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned} E \approx & -187.2399052684 + 0.3182486218 D \left(\frac{m}{X^3} \right)^{1/2} + \\ & 25.8920310632 \frac{D \cdot m^{1/3}}{r} + 2.1622154598 U^2 B^2 f^2 - \end{aligned}$$

$$0.6655682891 \frac{D^3 f_m U}{r^3} + 0.0372221169 \frac{D^3 f_m B}{r^3} \quad (\text{mV} \cdot \text{km}) \quad (12)$$

用 (12) 式计算得到的 E 值与测量值 E 对比见表 3

表 3

Table 3

实验号	测量值 $E / (\text{mV} \cdot \text{km})$	计算值 $E / (\text{mV} \cdot \text{km})$	$ E - E $ $/ (\text{mV} \cdot \text{km})$	相对误差 $/ (\%)$
1	166	171.889	5.889	3.550
2	178	172.129	5.871	3.300
3	168	167.930	0.070	0.034
4	174	174.025	0.025	0.014
5	216	216.029	0.029	0.013
6	203	202.990	0.010	0.005
7	186	186.008	0.008	0.004

由表 2 数据, 最后得到的回归方程为

$$E \approx 17.5875467461 - 0.0678680555x_1x_2 + 0.0580572118x_1x_3 + 0.0660130936x_1x_4 \quad (\text{mV} \cdot \text{km})$$

即

$$E \approx 17.5875467461 + D \left(\frac{m}{X^3}\right)^{1/2} \times \left(-0.0678680555 \frac{D f_m^{1/3}}{r} + 0.0580572118U + 0.0660130936B f\right) \quad (\text{mV} \cdot \text{km}) \quad (13)$$

(12)、(13) 式中右边各参量均用国际单位制。用 (13) 式计算得到的 E 与测量值 E 的对比见表 4

表 4

Table 4

实验号	测量值 $E / (\text{mV} \cdot \text{km})$	计算值 $E / (\text{mV} \cdot \text{km})$	$ E - E $ $/ (\text{mV} \cdot \text{km})$	相对误差 $/ (\%)$
14	189	193.233	4.233	2.24
15	244	238.257	5.743	2.35
17	131	131.000	0.000	0.00
18	237	240.574	3.574	1.51
19	152	149.936	2.064	1.36

4 结 论

(1) 化爆能产生强烈的电磁脉冲, 电磁脉冲的最大幅值随药量的增大而增大; 电磁脉冲的最大幅值随预制破片数目 (质量) 的增大而减小; 电磁脉冲的最大幅值随着测点距离的增加而有所减小。

(2)在爆炸实验中,测量的数据受很多系统误差和随机误差的影响,尤其是公式(7)中变量较多,所以,要回归出高度显著、性能优良的回归方程需要大量的实验数据。

(3)以药量、测量距离等为变量进一步做部分补充实验,可以期望得到能够用于计算常规炸弹电磁脉冲的回归公式。

化学爆炸近距离测量十分复杂,其原因有:(a)各种反射对象的复杂性,(b)模拟实验装置小,药量变化范围小,(c)实验的一次性和难以完全重复性,等等,因此我们仅给出了一些初步结论。

参 考 文 献

- 1 Trinks H. Electromagnetic Radiation of Projectiles and Missiles during Free Flight, Impact and Breakdown Physical Effects and Applications. In: 4th International Symposium on Ballistics Monterey, California [San Jose], 1978
- 2 van Lint V A J. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1982, 29(6): 1844-1849
- 3 Boronin A P, Kapinos V N, Krenov S A. Combustion, Explosive and Shock Waves, 1991, 26(5): 603-609

ELECTROMAGNETIC RADIATION CAUSED BY CHEMICAL EXPLOSION

Chen Shengyu, Sun Xinli, Qian Shiping, Wei Yinkang
(The Second Artillery Engineer College, Xi'an, 710025)

ABSTRACT In this paper, we studied the electromagnetic radiation caused by explosion of the explosive with the metal shell and carried out a series of explosion tests. Utilizing the method of dimension analysis, we obtained the relation between electromagnetic radiation and variables of the dynamics of explosion.

KEY WORDS chemical exploding, electromagnetic radiation, dimension analysis