

文章编号: 1001-1455(2007)03-0259-07

高-低爆速圆板炸药串联爆轰 引起平面爆轰波的变凸现象*

张万甲, 吴 强, 刘光祚

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为分析高-低爆速圆板炸药于空中串联爆轰时平面爆轰波在传播过程中演变成凸面波的现象, 分别对平面爆轰波阵面后爆轰产物状态参数的分布、有效药量与柱面装药几何尺寸的关系、爆轰产物的状态方程及强爆轰关系式进行了讨论。并以 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的 TNT 与 RC 炸药串联爆轰为例, 描述了平面爆轰波演变为凸面爆轰波的过程, 预估了爆轰波的平面范围和波形差。预估结果与实验结果基本符合。

关键词: 爆炸力学; 强爆轰; 有效药量; 串联爆轰

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引 言

炸药爆轰加载是最常用的动载荷技术之一, 满足平面 1 维爆轰条件是大多数实验研究对加载装置的基本要求。但是在爆轰的激发与传播过程中, 常会有高爆速炸药和低爆速炸药串联使用的情况, 例如高爆速的平面波透镜引爆低爆速的主药柱。由于 2 种炸药的化学、物理性质的差异, 当平面爆轰波从高爆速炸药通过接触界面进入低爆速炸药时, 会导致在低爆速炸药中传播的爆轰波逐渐偏离平面 1 维条件, 致使实验测量和结果分析复杂化。为此, 本文中拟对高-低爆速圆板炸药串联爆轰在低爆速炸药中平面爆轰波演变为凸面波的实验现象进行初步分析。

在 CJ 模型基础上建立起来的爆轰流体动力学理论, 正确地解释了爆轰过程的基本宏观特性, 可以借助它来研究爆轰波及其产物的运动, 分析爆轰作用和效应等, 本文所要进行的高-低爆速圆板炸药串联爆轰引起平面爆轰波变凸现象的分析, 也将按爆轰流体动力学理论^[1-3]进行, 不涉及爆轰波阵面结构、反应机理等内容。

2 平面正常爆轰波阵面后爆轰产物状态参数的分布

设有一圆柱炸药, 其左端面位于 $x=0$ 处, 现于 $t=0$ 时刻在整个端面同时引爆, 则得到一稳定的平面爆轰波以速度 D_J 沿 x 正方向传播, 在传播过程中, 爆轰波阵面上产物的压力 p_J 、密度 ρ_J 、速度 u_J 和声速 c_J 都始终保持为常数, 并满足

$$p_J = \frac{\rho_0 D_J}{k+1}, \quad \rho_J = \frac{k+1}{k} \rho_0, \quad u_J = \frac{1}{k+1} D_J, \quad c_J = \frac{k}{k+1} D_J$$

这就是通常所称的 CJ 爆轰(或称正常爆轰)关系式, 其中 ρ_0 为炸药初始密度, k 为多方指数。爆轰理论已经证明, 在爆轰产物雨贡纽曲线的 CJ 点上, 炸药单位质量释放的能量 Q 取极大值, 熵 S 取极小值, 爆速 D_J 也取极小值, 由于化学反应释放出的能量维持了爆轰的自持发展, 所以 CJ 爆轰是最稳定的爆轰。因正常爆轰有 $D_J = u_J + c_J$, 爆轰波的传播不受波后扰动的影响, 能保持整个爆轰过程的稳定性, 故正常爆轰波在均质炸药中传播时, 能始终保持其平面 1 维运动。

空中平面爆轰产生的中心稀疏波族如图 1 所示。在 1 维运动的情况下, 气体动力学的基本方程为

* 收稿日期: 2006-01-13; 修回日期: 2006-07-03

作者简介: 张万甲(1936—), 男, 副研究员。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2}{k-1}c \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad \frac{2}{k-1} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{2}{k-1}u \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

如所周知,由这两个关系式可导出方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(u \pm \frac{2}{k-1}c \right) + (u \pm c) \frac{\partial}{\partial x} \left(u \pm \frac{2}{k-1}c \right) = 0 \quad (2)$$

此时,当 $u = \pm \frac{2}{k-1}c + \text{const}$ 时,方程(2)恒等地得到满足并可写为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \pm c) \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

此时方程(2)的解是

$$x = (u \pm c)t + f(u), \quad u = \pm \frac{2c}{k-1} + \text{const} \quad (4)$$

式中: $f(u)$ 是由初始条件决定的任意函数,由于全部 c_+ 特征线都发自坐标原点(0,0),故得 $f(u) = 0$,又由于在爆轰波面上有 $u_1 = D_1/(k+1)$ 和 $c_1 = kD_1/(k+1)$,所有 c_- 族特征线上的黎曼不变量为同一常数,故式(4)中 $\text{const} = -D_1/(k-1)$,这样整个稀疏波区可由下列方程描述

$$u = \frac{2}{k+1} \frac{x}{t} - \frac{1}{k-1}D_1, \quad c = \frac{k-1}{k+1} \frac{x}{t} + \frac{1}{k+1}D_1 \quad (5)$$

根据式(5),下面对稀疏波区的几个特征位置上的状态参量作进一步分析。

在爆轰波阵面上满足正常爆轰条件,在 $x = D_1t/2$ 处,根据式(5)有

$$u = 0, \quad c = D_1/2 \quad (6)$$

式(6)说明,爆轰波传播距离的中点是波后质点速度的反转点,当 $x > D_1t/2$ 时,质点朝右飞散,当 $x < D_1t/2$ 时,质点朝左飞散,在这一点上质点速度为 0。

爆轰产物向真空飞散的自由面上,因为 $c = 0, \rho = 0, p = 0$,由式(5)可得产物自由面轨迹及速度为

$$x = -\frac{1}{k-1}D_1t, \quad u_t = -\frac{1}{k-1}D_1 \quad (7)$$

式(7)说明,产物与爆轰波反向以常速向真空飞散。

从上面的讨论看出,产物分布的空间为 $-D_1t/(k-1) \leq x \leq D_1t$,稀疏波头为 $x = (u_1 + c_1)t = D_1t$,波尾为 $x = u_t t = D_1t/(k-1)$,在多方指数 $k=3$ 的情况下,爆轰产物中各状态量的空间分布曲线如图 2 所示。对于每一个固定时刻,爆轰产物的 u 和 c 的空间分布都是线性的,他们的值正比于坐标 x 。在 $k=3$ 时,密度 ρ 的空间分布也是线性的。只有压力 $p = p_1(c/c_1)^{2k/(k-1)}$ 是 x 的非线性函数,它随 x 的减小而迅速下降,只在爆轰波阵面后不大的区域内保持较高压力。

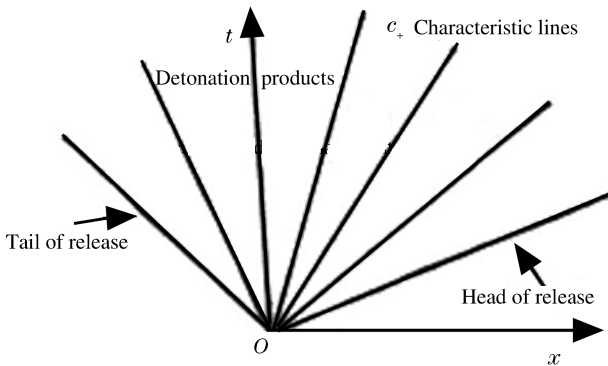


图 1 空中平面爆轰产生的中心稀疏波簇
Fig. 1 A centred rarefaction wave clusters resulted by planar explosive detonation in space

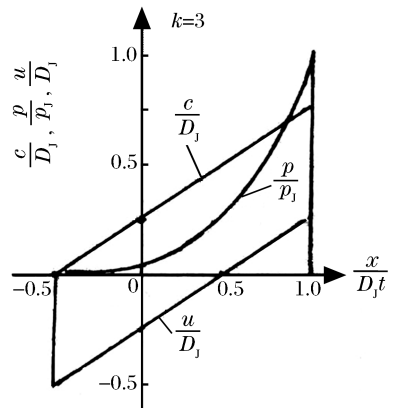


图 2 爆轰产物状态参量的空间分布
Fig. 2 Distribution of state parameters of detonation products in space

3 平面爆轰时的有效药量

由上节的分析看出,当炸药在左边自由端面同时起爆后,一部分爆轰产物朝爆轰波传播方向(x 正向)飞散,一部分爆轰产物朝爆轰波传播的反方向飞散,当不存在侧向稀疏时,现已证明,炸药柱从左到右爆轰结束后,最终有炸药总质量的 $4/9$ 从爆轰波传播方向飞出去,而其余 $5/9$ 的炸药质量中,一部分滞留在炸药柱原体积所占的空间内,一部分则向负 x 方向飞散,产物经右端面向前带走的动量和能量分别为炸药总动量和能量的 $16/27$ 。由此可见,少于一半的炸药质量带走了多于一半的动量和能量,这表明炸药的动量和能量在爆轰波运动的方向上相对集中,因而爆轰产物朝爆轰波传播方向的作功本领最大,在实验研究中所利用的也就是这一部分炸药质量所携带的动量和能量,通常称这部分炸药质量为有效药量。如果用 M 表示炸药的总质量,用 Q 表示炸药单位质量的能量,当给定装药半径 R 和装药长度 L 后,在爆轰产物作管道流的条件下,则在爆轰波传播方向上集中的质量 m 、动量 I 和能量 E 分别为

$$\begin{aligned} m &= 4M/9 = 4\rho_0 \pi R^2 L/9 = \rho_0 V_0 \\ I &= 16Mu_1/27 = 4u_1\rho_0 V_0/3 = \rho_1 u_1 V_0 \\ E &= 16MQ/27 = 4Q\rho_0 V_0/3 = \rho_1 QV_0 \end{aligned} \tag{8}$$

式中： $V_0 = \pi R^2 l_0$ 为有效药量的体积， $l_0 = 4L/9$ 为有效药量的长度。 $k=3$ 时， $\rho_1 = 4\rho_0/3$ 。因此当炸药柱侧面有刚性圆筒时，有效装药的长度 l_0 随装药长度 L 的增加而增加，不存在极限值。

如果炸药的侧面也是自由边界时，则必须考虑爆轰产物的旁侧飞散，在计及旁侧飞散时，装药的有效体积明显减小，如图 3(a)所示，若设 c 为稀疏波由侧面向装药轴心传播的速度，对装药半径为 R 的圆柱炸药，装药有效部分的极限长度 l_0 需满足 $l_0/D_1 = R/c$ 。所以考虑产物的旁侧稀疏时，对装药半径为 R 的圆柱炸药，其有效药量的极限长度 l_0 可表示为

$$l_0 = RD_1/c \tag{9}$$

取稀疏波速度 $c = D_1/2$ (见式(6)，该值十分接近实际情况)，得 $l_0 = 2R$ ，且有效部分的极限长度同时还应满足 $l_0 = 4L/9$ ，所以当装药长度 $L = L_0 = 9R/2$ 时，则可以得到存在侧向稀疏时有效装药的极限长度 l_0 ，与产物作管道流不同，装药长度 $L > L_0$ 时，有效装药也不会再增加。从图 3(a)可知，考虑到旁侧稀疏时，装药的极限有效体积 V_1 (图中的阴影部分)为

$$V_1 = \pi R^2 l_0/3 = V_0/3 \tag{10}$$

式(10)表明，在相同装药尺寸下，由于侧向稀疏，装药有效体积减小了 $2/3$ 。

在大多数实验中，装药长度 $L < R$ ，而且侧向没有固壁圆套，在这种条件下，有效装药的体积是一个正圆锥台，如图 3(b)所示，正圆锥台的体积

$$V_2 = \pi l(R^2 + r^2 + Rr)/3 \tag{11}$$

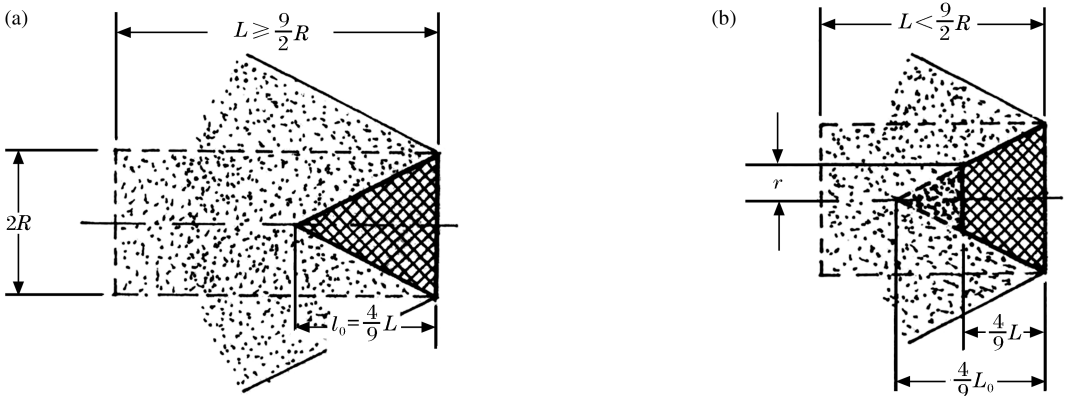


图 3 柱形装药的有效部分

Fig. 3 Effective volume for the cylindrical explosive

在装药半径 R 相同的条件下,正圆锥台体积 V_2 较极限体积 V_1 又小了 $\pi r^3 R/[3(R-r)]$ 。正圆锥台区域通常称为爆轰头,在爆轰头内,产物保持 1 维运动,产物速度等于 CJ 爆轰波后的质点速度 u_1 ,只有爆轰头才是真正对样品作功的有用部分,相对于波后整个产物,它只占很有限的一部分体积。

4 爆轰产物的状态方程和强爆轰

多数炸药都是有机化合物,最典型的爆轰产物为 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 NO 、 H_2 、 N_2 、 O_2 和 C 等多相气体混合物,爆轰产物的运动为多方过程,多方气体的状态方程可表示为

$$p = A(S)\rho^k \quad (12)$$

式中: $A(S)$ 是熵的函数,因爆轰产物作等熵膨胀运动,所以 $A(S)$ 可看作常数。 k 是多方指数,它是压力和体积的函数。在图 1 所示的爆轰产物分布空间内,在爆轰波阵面(稀疏波头)及其波后附近的区域,爆轰产物是一种高度压缩的混合气体,其密度 ρ_1 已显著高于其固态时的密度 ρ_0 ,分子之间有很强的相互作用,实验已经证明,其多方指数的平均值 $\bar{k} \approx 3$ 。本文所讨论的问题正是在这一区域,所以本文中均取多方指数 $k=3$ 。但对于稀疏波的尾部区域,产物中的压力和密度都已很低,可以看作是理想气体,其多方指数已逐渐由 $k=3$ 演变至 $k=5/4 \sim 7/5$ 。

按照爆轰流体动力学理论,可以把炸药中传播的爆轰波看作带化学反应的冲击波,在这个不断释放能量的冲击间断阵面上,描述流体力学运动的 3 个守恒关系同样满足,其中质量和动量守恒与惰性材料中普通冲击波的完全一样,只在能量守恒关系式中增加化学反应释放出的能量项,因此炸药的雨贡纽关系可表示为

$$e - e_0 = (p + p_0)(v_0 - v)/2 + Q \quad (13)$$

式中: Q 是炸药单位质量释放的能量, e 、 p 、 v 分别为比内能、压力和比容,带下标“0”的为波前的状态参量,不带脚标的为波后的状态参量。爆轰波的瑞利直线与冲击波的也是相同的

$$p - p_0 = \rho_0^2 D^2 (v_0 - v) \quad (14)$$

式中: D 为爆速。由热力学定律及所给的状态方程(12),可以得到内能函数

$$e = - \int p dv = pv/(k-1) + B(S) \quad (15)$$

式中: $B(S)$ 是积分常数,它依赖于熵 S ,将式(15)代入式(13),并与式(14)式联立,消去 v ,得

$$\frac{v_0^2}{2D^2} \frac{k+1}{k-1} (p - p_0)^2 + \left(\frac{kp_0 v_0}{D} - D \right) \frac{v_0}{(k-1)D} (p - p_0) + Q' = 0 \quad (16)$$

式中: $Q' = Q - p_0 v_0 / (k-1) + e_0 - B(S)$ 。式(16)是一个 $(p - p_0)$ 的 2 次方程,它的根为

$$p - p_0 = \frac{k-1}{k+1} \frac{D}{v_0} \left[\frac{D}{k-1} - \frac{k}{k-1} \frac{p_0 v_0}{D} \pm \sqrt{\left(\frac{D}{k-1} - \frac{k}{k-1} \frac{p_0 v_0}{D} \right)^2 - \frac{2(k+1)}{k-1} Q'} \right] \quad (17)$$

当式(17)的判别式为 0 时,2 根重合,这就是 CJ 爆轰的解。当 p_0 可忽略不计时,由 3 个守恒关系式就可得出前面提到的 CJ 爆轰关系式。

如果式(17)根号前取正号,则相当于强爆轰的情况,当强爆轰的压力 $p \gg p_0$ 时,可得

$$p = \frac{\rho_0 D^2}{k+1} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{D_1}{D} \right)^2} \right] \quad (18)$$

现在引进参量 $z = \sqrt{1 - (D_1/D)^2}$ 来表示强爆轰区别于 CJ 爆轰的程度,因而强爆轰的爆速 D 可表示为 $D = D_1 / \sqrt{1 - z^2}$, 将其代入式(18)得到的强爆轰的压力表达式和由守恒关系得出的强爆轰的参量 u 、 ρ 、 c 的表达式为

$$\begin{aligned} p &= \frac{\rho_0 D_1^2}{k+1} \frac{1}{1-z} = \frac{p_1}{1-z}, & u &= \frac{D_1}{k+1} \frac{\sqrt{1-z^2}}{1-z} = u_1 \sqrt{\frac{1+z}{1-z}} \\ \rho &= \rho_0 \frac{D}{D-u} = \rho_1 \frac{1}{1-z/k}, & c^2 &= kp/\rho = c_1^2 \frac{1-z/k}{1-z} \end{aligned} \quad (19)$$

相对于波后产物，强爆轰波速度是亚声速，即 $(D - u)^2 < c^2$ ，因此稀疏波最终将追上爆轰波并使它减弱，所以强爆轰不能自持，只有当波后产物有速度大于 u_1 的活塞匀速推动时才有可能维持强爆轰。

当式(17)根号前取负号时，相应于弱爆轰情况，从物理上来看，一般难以实现弱爆轰，这里不讨论。

5 高爆速和低爆速厚圆板炸药串联爆轰产生的波形差和状态差

用厚度 L 小于半径 R 的高爆速和低爆速厚圆板炸药串联爆轰，平面爆轰波从高爆速炸药 A 传向低爆速炸药 B，如图 4(a) 所示，在炸药 A 中，当爆轰波传播到 A-B 交界面时，爆轰波后的爆轰头有如图 4(b) 所示的形状，爆轰波一旦通过 AB 两种炸药的接触界面进入到低爆速炸药 B，按照 CJ 理论，应该有一个正常爆轰波在炸药 B 中从左向右传播，但是由于在爆轰波阵面后已经有一个由高爆速炸药的爆轰产物所形成的高压区(图 4(b)所示阴影区)，由于在这个高压区中的质点速度大于炸药 B 中波后产物的质点速度，即 $u_{JA} > u_{JB}$ ，因此在 B 中产物的飞散将受到阻碍，爆轰头相当于一个活塞推动炸药 B 中的产物以 u_{JA} 的速度一起运动，从而由活塞发出的 c_+ 特征线从一开始就赶上在炸药 B 中传播的爆轰波阵面，把活塞的影响传给爆轰波，显然，活塞的作用将使在 B 中传播的爆轰波得到加强，从而使它的爆速 D 大于它的正常爆速 D_{JB} ，即在炸药 B 中产生了强爆轰。对于强爆轰波，由式(19)中的第 2 式有

$$u_{JA} = u_{JB} \sqrt{(1+z)/(1-z)} \tag{20}$$

由式(20)可得出增强因子

$$z = \frac{(u_{JA}/u_{JB})^2 - 1}{(u_{JA}/u_{JB})^2 + 1} \tag{21}$$

式中 u_{JA} 和 u_{JB} 分别为炸药 A 和 B 正常爆轰时的爆轰产物速度，都是已知的特性常数，因此强爆轰因子 z 便可确定。知道 z 后，就可求出强爆轰波后的其他参数

$$D = D_{JB} / \sqrt{1 - z^2} = D_{JB} (u_{JA}/u_{JB} + u_{JB}/u_{JA}) / 2, \quad p = p_{JB} / (1 - z) = p_{JB} [1 + (u_{JA}/u_{JB})^2] / 2$$

$$\rho = \frac{k}{k - z} \rho_{JB} = \frac{\rho_{JB} k [1 + (u_{JA}/u_{JB})^2]}{k + 1 + (k - 1)(u_{JA}/u_{JB})^2}, \quad c = c_{JB} \left[\frac{k + 1 + (k - 1)(u_{JA}/u_{JB})^2}{2k} \right]^{1/2} \tag{22}$$

因此在炸药 B 中，在圆锥台形的爆轰头底部所控制的区域具有强爆轰的状态参量，爆轰波将以强爆轰波速度运动，而在炸药的边部则具有炸药 B 正常爆轰的状态参量，波将以正常爆速传播，随着爆轰波的前进，由波后状态差所引起的波形差将逐步显示出来。另外，由于后面和侧面稀疏波的影响，圆锥台形状的爆轰头在运动过程中将逐渐缩小直至消失，如图 4(c) 和图 4(d) 所示，因为强爆轰是不稳定爆轰，当推动它维持强爆轰的活塞消失时，强爆轰将很快退化到正常爆轰状态，此时波后的状态差消失，但中部与边侧的波形差将继续存在。可见，当高爆速炸药和低爆速炸药串联爆轰时，爆轰波将演变成如图 4(d) 所示的带一定平面范围的凸面波。

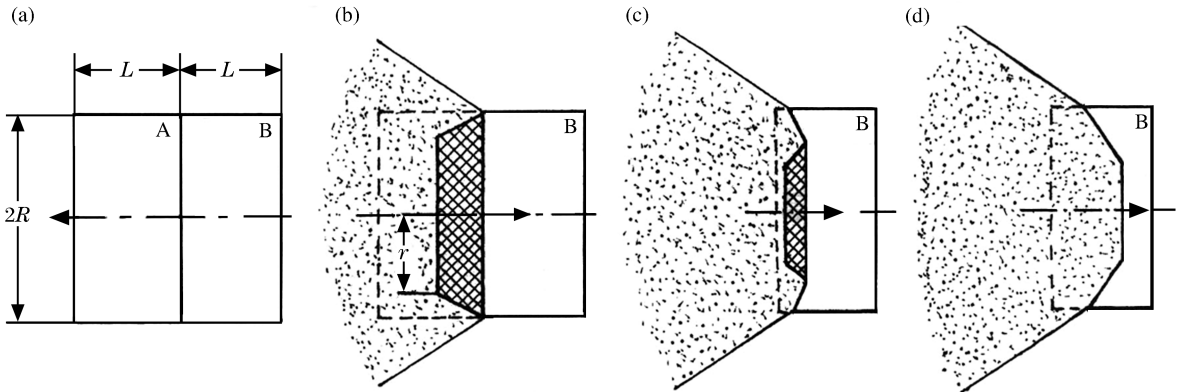


图 4 高-低爆速炸药串联爆轰时，平面爆轰波变凸的演化过程示意图

Fig. 4 Evolution of a plane wave changed into a convex wave induced by series-detonation of circular explosives with high and low detonation velocities

下面以 $\varnothing 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的 TNT 和 RC 炸药串联爆轰出 RC 底部波形的平面范围和边侧滞后的时间差为例具体说明, TNT 和 RC 正常爆轰时的主要状态参量列于表 1 中, 多方指数 $k=3$ 。

表 1 TNT 和 RC 的 CJ 爆轰参数

Table 1 The parameters at the CJ point for TNT and RC

炸药	$\rho_0/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$D_j/(\text{km}/\text{s})$	p_j/GPa	$u_j/(\text{km}/\text{s})$	$c_j/(\text{km}/\text{s})$	$\rho_j/(\text{g}/\text{cm}^3)$
TNT	1.64	6.8	18.8	1.7	5.1	2.19
RC	0.825	4.3	4.8	1.07	3.23	1.1

根据式(22), 计算出 TNT 和 RC 串联爆轰时, RC 炸药中的强爆轰波参数分别为, 爆速 $D=4.77\text{ km/s}$, 爆压 $p=8.45\text{ GPa}$, 质点速度 $u=1.7\text{ km/s}$, 声速 $c=3.97\text{ km/s}$, 密度 $\rho=1.28\text{ g}/\text{cm}^3$ 。

当 TNT 中的爆轰波到达 TNT-RC 的接触界面时, 爆轰波阵面后的圆锥台形爆轰头的几何尺寸为: 圆锥台高 $l=4L/9=22\text{ mm}$, 按简单的几何关系, 可得出圆锥台的上底直径为 78 mm , 下底炸药直径为 100 mm 。相对于爆轰产物, 如果后面稀疏波速度 $c=D_{JA}/2=3.4\text{ km/s}$, 则 $6.5\text{ }\mu\text{s}$ 后由圆锥台上底发出的稀疏波达到圆锥台的下底, 此时圆锥台消失, 即在 RC 中维持强爆轰的条件已不存在。侧面稀疏波同样以 3.4 km/s 的速度从圆锥下底部边向中轴传播, $6.5\text{ }\mu\text{s}$ 后将从边侧深入约 22 mm , 因此对于 $\varnothing 100\text{ mm}$ 的药柱, 约有 $\varnothing 56\text{ mm}$ 的中心部分没有受到边侧稀疏的影响, 也就是说在 $\varnothing 56\text{ mm}$ 的中心部分保持平面 1 维条件。

在未受边侧稀疏影响的中心部, 前 $6.5\text{ }\mu\text{s}$ 以强爆轰波速度 4.77 km/s 传播, 其余则以 RC 炸药的正常爆速 4.3 km/s 传播, 因此在炸药厚度为 50 mm 的距离上, 中部所需的传播时间约为 $10.91\text{ }\mu\text{s}$, 在 RC 炸药的最外侧, 则始终以它的正常爆速 4.3 km/s 传播, 它所需的传播时间为 $11.63\text{ }\mu\text{s}$, 所以出 RC 底面爆轰波形边部滞后的时间约为 $0.72\text{ }\mu\text{s}$ 。

从上面粗略估算看出, 高爆速的 TNT 和低爆速的 RC 炸药串联爆轰时, 原来的平面爆轰波出 RC 底面时将演变成如图 4(d) 所示的带一定平面范围的凸面波。图 5 是用 $\varnothing 100\text{ mm}\times 50^\circ$ 的 TNT 平面透镜起爆 $\varnothing 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的 RC 炸药出底表面的实测波形, 预估的结果与实测结果基本相符。

6 结 束 语

爆轰系统的激发与爆轰的传播, 有时会串联使用高爆速炸药和低爆速炸药, 对于厚圆板平面爆轰系统, 这种串联爆轰会导致爆轰波偏离平面 1 维状态, 使有效测量范围缩小, 实验测量受到影响, 也可能使实验结果的分析变得复杂。通过上面的分析, 可以预估波形满足平面一维条件的范围和波形边部滞后的时差, 这种理论上的分析结果, 将给爆轰加载装置的设计及测试样品布局提供指导性意见。

炸药爆轰加载是一种应用广泛的动载荷技术, 对出现的各种爆轰现象进行深入的分析研究, 认识其内部运动的规律, 了解其全过程, 使所研究的现象为人们所掌控, 这是改进、完善实验技术所必需的, 也是保证实验结果真实、可靠所必需的。本文所讨论的现象希望能引起有关科技工作者的关注。

张林、蔡灵仓、彭建祥等同志参加了这一问题的讨论, 刘仓理同志审阅了文稿, 对他们提供的宝贵意见, 谨致以衷心感谢。

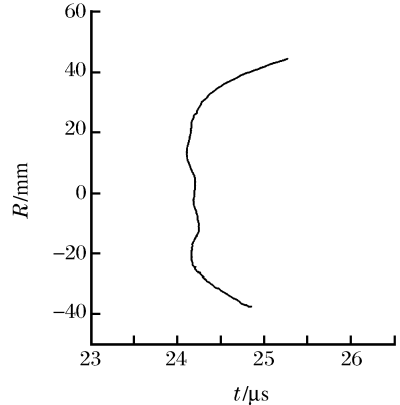


图 5 $\varnothing 100\text{ mm}\times 50^\circ$ TNT 平面透镜 + $\varnothing 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ RC 主药柱, 出底表面实测波形

Fig. 5 The really measured waveform at the front surface of RC explosive by using $\varnothing 100\text{ mm}\times 50^\circ$ TNT planar lens and $\varnothing 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ RC main charge

参考文献:

- [1] 李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
[2] 孙锦山,朱建士. 理论爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
[3] Ф. А. 鲍姆. 爆炸物理学[M]. 北京:科学出版社,1963.

**Analysis on a plane detonation wave changed into a convex wave
induced by series-detonation of cylindrical explosives
with low and high detonation velocities**

ZHANG Wan-jia^{*}, WU Qiang, LIU Guang-zuo

*(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China)*

Abstract: The distribution of state parameters for detonation products behind the wave front, the relationship between the effective explosive volume and cylindrical charge geometry, the state equation of detonation products and the expressions of strong detonation were respectively discussed to analyse the phenomenon on a plane detonation wave changed into a convex wave induced by series-detonation of cylindrical explosives with low and high detonation velocities. The evolved process of a plane detonation wave changed into a convex wave was described by taking series-detonation of $\varnothing 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ TNT and $\varnothing 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ RC cylindrical explosives for example, and the plane area and the lagging time from the center section to the edge of the waveform were predicted. The predicted results is consistent with the measurements.

Key words: mechanics of explosion; strong detonation; effective explosive volume; series-detonation

^{*} Corresponding author: ZHANG Wan-jia
Telephone: 86-816-2488480