

炸药爆轰波的波形控制及应用

陈 维 波

(中国科学院力学研究所)

控制炸药爆轰波的波形和提高炸药利用率已是许多学者研究的课题,也是工程上提出的要求,炸药爆轰波具有“光学”的特性,在传播过程中碰到障碍物也会被反射与衍射。

一些研究者应用这个规律性,控制并得到各种类型波形,如精确控制爆轰波的形状使它聚焦,它就能引爆原子弹。柱面收缩波能够得到很高的压力与温度,用它合成新材料,在常规武器弹药中插入一定形状的物体,能够改变爆轰波的形状,提高弹药效能。导弹及宇宙飞船已大量使用炸药开关电路、启闭阀门、切割与抛射物体等。

平面爆轰波在国内外已广泛做为动高压装置,用它驱动金属板,研究材料在动高压冲击下的性质。同时也成功地应用这种装置将石墨转化为金刚石。炸药的平面透镜也是研究炸药状态方程不可缺少的工具。

综上所述,爆轰波形状的控制无论在工程上或是在科学研究中都具有重要意义。

一、波形控制的方法

控制爆轰波的方法很多,常用的方法有三种,一种是电引爆法,它是强电流脉冲通过细金属丝时,金属丝以极快的速度熔融汽化并向周围介质扩张,出现冲击波与高温等离子体激发引爆炸药,据文献报道,已得到几英尺的线源^[1]。

一块金属膜被腐蚀成网状结构,每平方英寸有二百多个节点,与此同时,将太安炸药溶解后喷在这块金属膜上。引爆后能够得到几个平方尺的冲击荷载,这种方法引爆炸药可以用来驱动金属板。

第二种方法是光引爆法控制炸药波形^[2]。固体激光器可以产生一种脉冲波,经过 Q 开关,可产生强功率短时间脉冲波,而炸药的直接起爆正需要一个强冲击波,太安炸药对激光最敏感,它的最小起爆能量为1焦耳,激光引爆所获得的爆轰速度更接近理论爆速,目前只能获得较小面积平面波。

Egger^[6]最早指出,一些敏感炸药能够用闪光引爆,他与他的同事至少对16种固体混合物试验用光引爆,闪光释放的能量快速地把薄层炸药表面加热至起爆温度。人们就可以制造光敏起炸药,把它喷涂在平面或曲面上,然后用闪光照射使它起爆,能够得到不同的波形。

Nevill曾研究过一种光敏起炸药,用一定波长的光照射到9英寸长的光敏起炸药上达到同时爆震。

上述的两种方法由于技术比较复杂,局限于某些领域中的应用,我们暂不作详细的讨论。本文重点介绍第三种方法,即用单雷管起爆获得线状波、平面波和柱面收缩波的方法。

炸药单点起爆后,为了控制爆震波同时到达某一曲线或曲面上,一般在靠近起爆点的地方插入某些形状物体延长波传播时间,或增加传播路程的长度,或用低速炸药减慢波传播速度来实现这一目的。用这些方法能够得到多种多样的波形,如平面波、曲面波、方形波及星形波等。Busco^[3]在第五届国际爆轰会议上,对爆轰波的光学性质做了简单的介绍。

二、线状波

线状波是各类爆轰波中最简单的一种类型,通常应用的有以下三种:

A型线状波

它是从顶点起爆后最终扩展到近似直线的波形。具体的做法是在板状炸药上按等边三角形设计打了很多小圆孔(详见图1)。

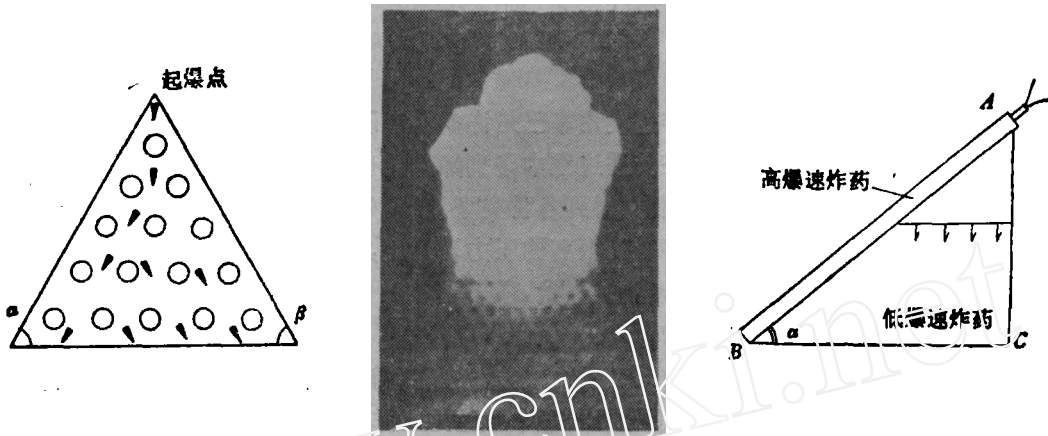


图1 A型线状波

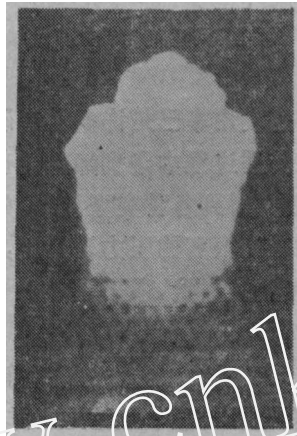


图2 A型线状波高速摄影照片

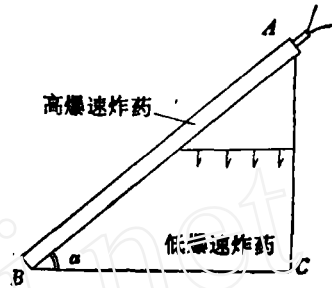


图3 B型线状波图

由于同一块板状炸药各处爆速相等, α 与 β 角也一样,那么在三角形的底线上,爆轰波可以看作是同时到达,孔数越多,线状波更接近于直线,图2是用高速摄影拍摄的照片。但孔数不能太多,孔径也不能太小,否则炸药会在两孔之间直接传爆。

实验条件:塑料板状炸药。厚度10毫米,孔径16毫米,孔心间距23毫米,高速摄影频率为50万幅/秒。

B型线状波

它是由两种不同的爆速组合来实现的,高爆速炸药选用爆速为6500米/秒塑料板状炸药,低爆速炸药爆速2600米/秒,高低爆速炸药组合线状波(图3)。

先是从A点起爆,高速炸药由A传播到B,低速炸药从A传播到C,为了满足从A同时到达B与C,两种炸药组合角度 α 可按式计算:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{D_L}{D_H} \right)$$

式中 D_L ——低速炸药爆速; D_H ——高速炸药爆速。

我们任意取ADE的途径,通过ADE路程所需要的时间应与A至B或A至C所需的时间一样。用高速摄影拍照得到照片如图4所示。

C型线状波

这种线状波很简单,它是在金属窄条上安放薄片炸药,金属板与被撞击的炸药有一个 α 夹角,见图5。

炸药从右上端起爆后沿着a至b方向爆轰,假定爆轰是稳定的,若 α 角度选择正确,底部炸药可以同时被撞击起爆。 α 角的大小可用下式来确定

$$\lg \alpha = \frac{V}{D}$$

式中V为飞板撞击速度(米/秒);D为驱动板炸药爆速(米/秒)。



图4 B型线状波高速摄影照片

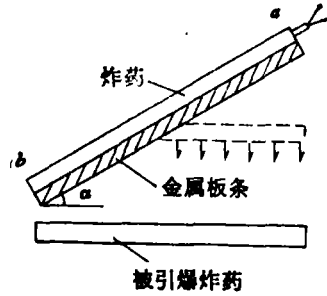


图5 C型线状波

飞板撞击速度用下式计算:

$$V = D \left(1 + \frac{\theta - 1}{\eta \cdot \theta} - \frac{h_0 \theta}{Dt} \right)$$

式中 $\theta = [1 + 2\eta(1 - h_0/Dt)]^{\frac{1}{2}}$, $\eta = \frac{16m}{27M}$, D 为炸药爆速(厘米/微秒), h_0 为炸药厚度(厘米), m 为炸药质量(克), M 为飞板质量(克), t 为时间(微秒)。

从公式中很容易推断相对撞击速度 V/D , 当炸药与板材选定后, 它只是质量比 $\frac{m}{M}$ 与时间 t 的函数。

举例说明, 取炸药 RDX/TNT (60/40), $\rho_0: 1.68$ 克/厘米³, $D: 0.795$ 厘米/微秒, 炸药厚度: 1 厘米。

铁飞片: ρ 为 7.8 克/厘米³, 厚度为 0.1 厘米, $M = 3.12$ 克。

质量比 $\eta = 0.798$ 代入上式计算结果如下: $V_{\max} = 0.1862$ 厘米/微秒, $\alpha_{\max} = 13^\circ 11'$ 。

三、平面波(平面波透镜)

平面波透镜广泛应用于炸药冲击波及爆轰波传播规律的研究, 也可以用它驱动金属板作为动高压手段。

关于平面波透镜的尺寸, 小的可以做到很灵巧, 仅有 1 英寸直径, 大的可达几十英寸, 在实验中经常见到是 4 英寸与 8 英寸两种, 平面波透镜的型式有多种多样。下面重点介绍“鼠夹式”与复合装药平面波透镜。

1. 鼠夹式平面波透镜

鼠夹式平面波透镜的形状与抓老鼠夹子很相似因此而得名。它是由点爆过渡到线爆最后形成平面爆炸。图 6 是这种平面波示意图, 它的特点是结构简单, 但精度低, 中间部位的平面度比周围高, 鼠夹式平面波 β 角的计算方法与 C 型线状波 α 角类似。在角度选择合适的情况下, 炸药爆轰至终点瞬间, 可以认为整个金属板一齐撞到炸药上, 从而得到平面波。

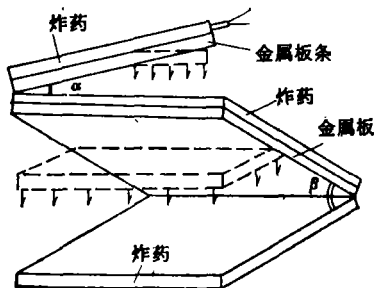


图6 鼠夹式平面波

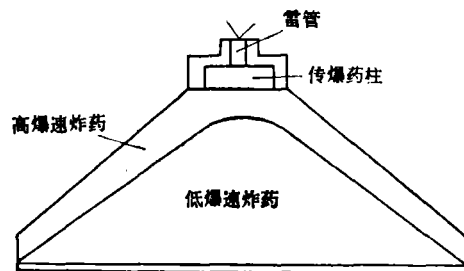


图7 复合装药结构图

2. 复合装药平面波

复合装药平面波它是由高低爆速两种炸药组合而成，高爆速炸药是梯恩梯与黑索金的混合物，低速炸药是梯恩梯与硝酸钡的混合物，图7是复合装药结构图。

为了能够得到平面波，关键在于如何选定两种炸药交界面曲线。在计算中假定：同一种炸药中爆速是常量，爆轰波传播过程满足几何光学原理以及爆轰波越过界面后立即以新的炸药介质速度传播。关于复合装药平面波设计的数学方法，参数分布，实验方法等已有专门文献论述，这里不再重复。

关于复合装药平面波透镜，国内外已有发展，无论在炸药品种或是在装药结构中都有改进。下面介绍低压力平面波透镜它的主要特点是直接用雷管引爆，交界面是直线，工艺也大大简化了。

这种平面波用的炸药是 PBX-9404 与硝基胍泡沫炸药组合而成。PBX-9404 的爆速是 8.8 毫米/微秒，硝基胍泡沫炸药密度是 0.3—0.4 克/厘米³，爆速是 3.15 毫米/微秒，用这种平面波得到铝与黄铜的冲击波辐值分别为 35—50 千巴，平面度可达到 ± 0.01 — ± 0.02 微秒，这种平面波结构如图 8 所示。

关于 θ 角的计算很容易从两种炸药爆速求得， $\theta = 20$ — 21° 。它的装配是很简单的，先把低速炸药挤到药包中，分次装药，每次装药高度不超过 1.5 厘米，用锥形冲头挤压到所期望的密度，然后用有机玻璃样板刮成所需要的形状，最后在顶部安放上 PBX-9404 炸药。用高速摄影研究波形发展过程，如图 9。

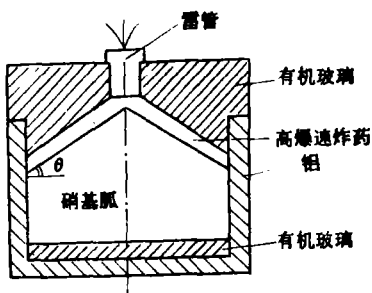


图8 低压力平面波

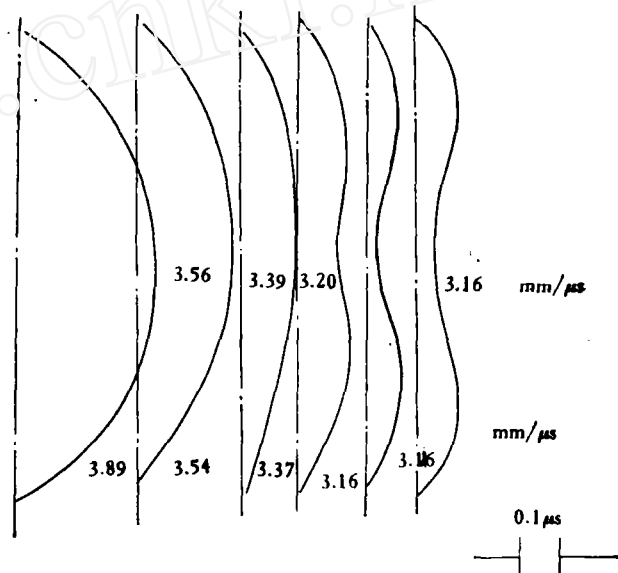


图9 波形发展过程图

从实验结果可以看出，用 PBX-9404 炸药来引爆硝基胍泡沫炸药，它有一个影响区，就是说在低速炸药中出现高爆速区域。实验测得这个影响区的长度大约 2.5 厘米，低速炸药如果是铸装炸药那么影响区就小，一般只有几个毫米。

Benedick^[4] 对这种装置做了详细研究，从爆轰传播的规律来论证这种复合装药可以获得平面波形。在工艺上研究了两种装药如何分配，保证它的平面度。

作者在直径 7.125 厘米，泡沫炸药密度 0.4 克/厘米³，在同一装药长度 L 条件下，测量不同部位爆轰波抵达时间，即可计算出爆速。爆速随 L 的变化见图 10。

实验结果可以看出，当 L 增大到 1 英寸后，不同部位的爆速趋向一致。这种实验装置，可以获得很高的平面精度与比较小的压力。用 150 克炸药就可以做一个很灵巧的平面透镜。

3. 飞片透镜

飞片透镜是大锥角的金属罩,在它的上面覆盖一层板状炸药,如图 11 所示。

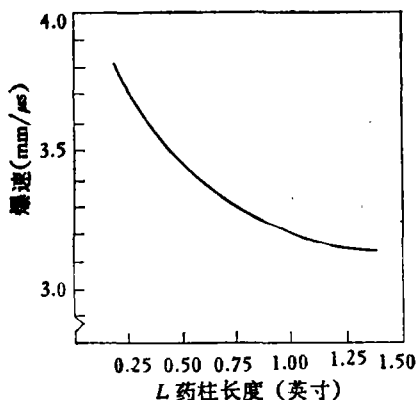


图 10 爆速随装药长度变化图

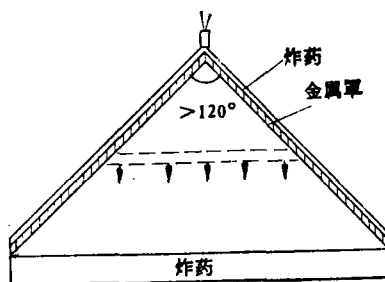


图 11 大锥角金属罩飞片透镜

它是先从锥顶引爆,炸药在爆轰的过程中对锥体加载,锥体向内翻转,当炸药爆轰抵达底部时,整个锥体拍打在底部圆饼状炸药上,使它同时起爆。

美国 Sandia 实验室 P. L. Stanton 研制出一种非常简单的平面波透镜,称 Stanton 飞片透镜,如图 12。

锥体是机加工件,板状炸药是由手工装配,由顶点引爆后,通过线状炸药使板状炸药引爆。W. B. Benedic 用电子计算机计算了锥体压垮的过程。国内学者也进行了计算。

四、柱面收缩波

柱面收缩波能够得到很高的压力,这种装置无论在工程上或是在研究工作中都是一个很理想的手段,可用来爆炸焊接厚壁筒以及合成新材料等^[5]。

获得柱面收缩波的方法很多,最简便的方法是点爆后过渡到线爆最后形成圆柱状收缩波。图 13 左侧是单雷管引爆,爆轰通过等长度的传爆线达到各个线状波的顶点,最后形成环形爆轰,圆环爆轰沿着圆柱筒母线进行,在圆柱内就形成一个柱面收缩波,有时工程上不需要精确的柱面收缩波,而在单点起爆后,通过等长度的传爆线到达圆柱表面,可以近似看作是收缩波,图 13 右侧就是属于这种情况。

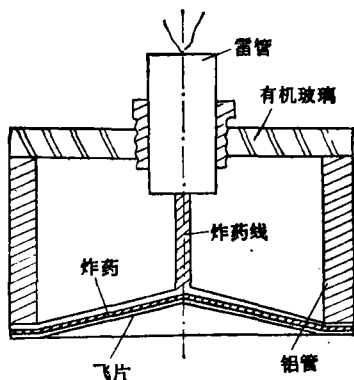


图 12 Stanton 飞片透镜

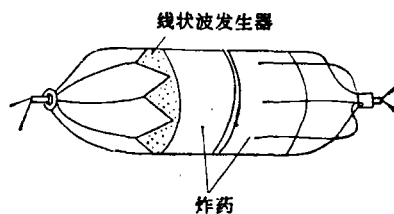


图 13 柱面收缩波

上述两种方法得到的都只是近似的柱面收缩波,为了获得理想的柱面收缩波,目前已采用两种高低爆速炸药组合来获得较为满意的柱面收缩波。这种装置示意图如图 14 表示。

半径为 a 的圆管,它的周围是低速炸药,高速炸药又把低速炸药包在中间,用线状波在 I 处引爆,高速炸药沿着外围爆轰,低速炸药可以认为被它相邻的高速炸药引爆。当两种炸药选定后,爆

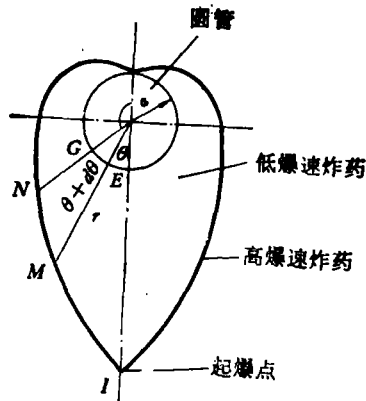


图 14 对数螺旋柱面收缩波

速是已知了。为了达到爆轰波同时达到圆管表面的设想,关键在于如何确定交界面的形状。按照爆轰传播过程满足几何光学原理,爆轰波越过低速炸药界面后立即以低速传播。我们很容易确定交界面几何形状,具体计算为:在高爆速炸药中任意选定两点 M 、 N 。它的相应的角度 θ 和 $\theta + d\theta$,按照爆轰波同时达到的原则,炸药从 I 引爆,经过 IME 的路程所需的时间应等于 $IMNg$ 的时间, IM 是共同的,可以消去,因此可得到

$$\frac{r-a}{D_s} = \frac{r d\theta}{D_F} + \frac{r-dr-a}{D_s}$$

$$\frac{1}{D_s} \frac{dr}{d\theta} = \frac{-1}{D_F} \cdot r$$

$$\int \frac{dr}{r} = \frac{-D_s}{D_F} \int_0^\pi d\theta$$

积分

$$\ln r = \frac{-D_s}{D_F} (\pi - \theta) - c$$

$$r = a \exp \left[-\frac{D_s}{D_F} (\pi - \theta) \right], \quad 0 \leq \theta \leq \pi$$

我们可以利用上式计算得到两种炸药交界面曲线。

爆轰波波形控制是工程与实验中提出的要求,系统研究波形控制方法与它的规律性,不仅可以作为生产与科研的工具,而且对工程中的许多共同性问题提供分析依据与解决问题的方法。

高速摄影照片由顾道良、王小荣、和喜莲等同志提供,表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Davis, W. C., proceedings of the 12 th annual Symposium, 2-3, March (1972), 5-14, Albuquerque, New Mexico.
- [2] Benedick, W. B., proceedings of the 12 th annual Symposium, 2-3, March (1972), 47-56. Albuquerque, New Mexico.
- [3] Busco, M., Proceedings Fifth Symposium on detonation, U. S. Naval Ordnance Laboratory (1970) 513-522.
- [4] Benedick, W. B., Rev. Sci. Instr., 36, 9 (1965), 1309-1315.
- [5] A. H. Guenther, proceedings of second conference on exploding wires, November (1961), 14-16.
- [6] Butler R. I. and Duggin. B. W., proceedings SESA Fall Meeting (1969).