DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1031-08

新型爆炸二极管及其机理研究*

崔　宇,马宏昊,沈兆武,王　飞,洪　泳,王鲁庆
(中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室,安徽 合肥 230026)

摘要: 针对工业上起爆网路的早爆问题,设计并研制了一种可控单向传爆的新型爆炸二极管,通过一系列理论计算以及对称结构正反起爆实验,研究了该爆炸二极管的正向稳定传爆及反向可靠隔爆机理和限制因素。结果表明:该爆炸二极管可实现正向稳定传爆,反向可靠隔爆,二者对应的限制因素分别为激发药药量和延期体长度。理论分析得到的激发药的极限药量和延期体的临界尺寸与实验结果较为吻合。

关键词: 爆炸二极管;极限药量;临界尺寸;延期体
中图分类号: O381　　**国标学科代码**: 13035　　**文献标志码**: A

工程爆破是工业建设上一项关键技术,而爆破作业中发生的事故[1]也促使研究人员关注爆破中安全技术。特别是高温火区等恶劣环境导致的炮孔早爆、误爆会反向起爆主体网路,造成重大伤亡[2]。2011 年,田成[3]分析了早爆发生的原因,提出防范应急方案。2013 年,张艳[4]结合施工现场工况,认定撞击引发了早爆,同年,张杰等[5]针对高温环境归纳了几种降温灭火的技术来预防早爆。2014 年,宋庆刚等[6]运用层次分析法指出杂散电流和明火引爆在早爆因素中占较大比重。

但是,上述研究均是分析早爆过程中的诱因、提出管理上的改进方案,并没有针对早爆提出一种安全的起爆网络技术。如果能设置当激发信号从主网络正向传递过来时能顺利起爆炮孔装药,而炮孔装药早爆的激发信号不能反向传递给主网络,将极大减少早爆的发生。2016 年,王飞[2]等提出一种可行的单向传爆元件,利用不同冲击感度多级装药结构来提高网路的安全,但是该结构以不同装药密度、感度的炸药作为隔爆材料,结构较复杂,并且采用多级装药结构也增加了工艺难度。

本文中利用飞片冲击起爆实现正向传爆,利用炸药在铅制延期体[7]元件处爆炸时,透射冲击波会被大幅度衰减的机理实现反向隔爆,设计一种新型爆炸二极管,该二极管结构简单、可靠性高。通过探讨激发药药量和延期体长度,揭示其作用机理,并进行正反装药实验进行验证。

1　新型爆炸二极管的结构及其机理研究

1.1　二极管结构

爆炸二极管的结构如图 1 所示,其正向输入端可以是导爆索(图 1(a)),也可以是导爆管(图 1(b))。金属管壳的内部有一个定位台阶,用来定位内帽,内帽中依次装有激发药和延期体(与管壳固连)。

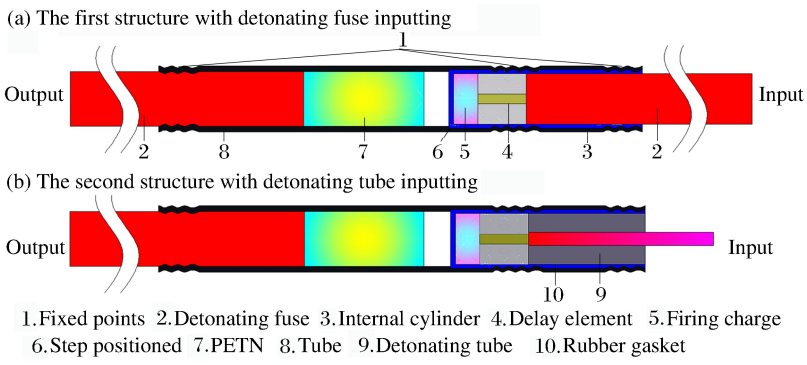

图 1　新型爆炸二极管的两种结构

Fig. 1　Two structures of explosive diode

*　**收稿日期**: 2016-04-19;　**修回日期**: 2016-11-04
基金项目: 国家自然科学基金项目(51374189,51174183)
第一作者: 崔　宇(1991—　),男,硕士研究生;　**通信作者**: 马宏昊,hhma@ustc.edu.cn。

1.2 新型爆炸二极管机理

1.2.1 正向传爆计算

当爆轰信号从图 1 右端的导爆索或者导爆管正向输入时，点燃延期体，延期体点燃内帽中激发药，激发药在狭小的密闭空间爆燃爆轰，剪切内帽底部形成高速飞片，撞击密度 1.0 g/cm^3 的太安并起爆，再传爆到输出端导爆索，完成爆轰信号的正向传递。由一维抛射理论[8]可以看出，激发药药量与飞片速度直接相关，因此有必要研究激发药药量和正向起爆间的定量关系。

认为激发药爆轰瞬间完成，根据激发药配比(RDX 和 $KClO_3$ 质量比为 1∶1)结合 B-W 法[9]书写化学反应方程式。由 Hess 定理 $Q_p=\sum Q_{\text{reaction}}-\sum Q_{\text{product}}$ 和 $Q_V=Q_p+2.478(n_1-n_2)$ 可得 $Q_V=4\ 696$ kJ/kg，其中 Q_p 为定压反应热，Q_V 为定容反应热。具体参数见表 1。

$$8.16KClO_3+4.5C_3H_6N_6O_6\rightarrow 13.5CO_2+13.5H_2O+8.16KCl+13.5N_2+5.49O_2+Q_p$$

表 1 各种物质标准定压生成热表[9]

Table 1 Standard heat of formation of the substances[9]

物质	$KClO_3$	$C_3H_3N_6O_6$	CO_2	H_2O	KCl	N_2	O_2
Q_f/(kJ·mol^{-1})	389.9	−65.44	395.43	241.7	430.8	0	0

由于延期体通过挤压和内帽一起固连在壳体，认为激发药被封闭在密闭空间中。忽略壳体以及延期体瞬间变形以及在周围空气中产生的冲击波，认为爆轰气体速度呈线性分布[8]，当飞片运动距离为 $2l$(l 为装药长度)时，钢飞片能达到其最大速度的 95%[8]，所以这里选用飞片飞行距离为 $2l$。设飞片速度为 v_0，建立一个简化计算模型，如图 2 所示，计算出飞片飞行至距离 $2l$ 处的速度 v_0，并撞击太安。

由能量守恒定律，有：

$$mQ_V=E_s+E_k+E_g+E_i \tag{1}$$

式中：m 是激发药药量，E_s 是飞片产生的剪切能，E_k 是飞片到达 $2l$ 处的动能，E_g 是爆轰气体动能，E_i 是爆轰气体内能。质量为 M 的飞片，速度为 v_0，其动能为 $E_k=Mv_0^2/2$。

根据假设，爆轰气体速度呈线性分布，其动能为：

$$E_g=\int_0^{2l}\frac{\rho S}{2}\left(\frac{x}{2l}v_0\right)^2\mathrm{d}x \tag{2}$$

式中：ρ 是爆轰气体密度，S 是截面积，x 是距离底部积分距离。

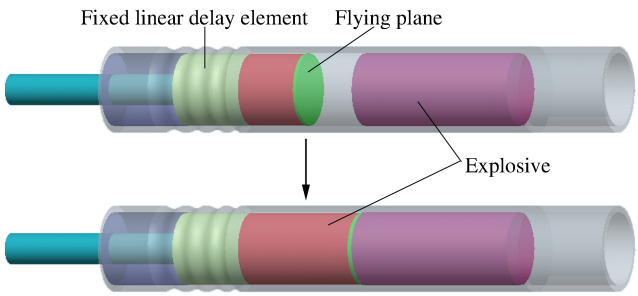

图 2 正向传爆计算模型示意图

Fig. 2 Model for calculation of positive detonation transmission

对于爆轰气体，其内能 $E_i=mp/(\rho(\gamma-1))$，采用理想气体状态方程，爆轰产物压力 $p=A\rho^\gamma$，对于瞬间反应完成的炸药，反应放热全部转变为内能，有 $Q_V=p_0/(\rho_0(\gamma-1))$，其中 p_0 为初始压力，ρ_0 为初始密度，可得：

$$E_i=\frac{mQ_V}{4} \tag{3}$$

对于飞片的剪切能 E_s，认为实验测得当激发药药量从 0 达到 m_0 时，内帽底部恰好能够产生飞片，认为此时激发药的爆轰能量完全用来产生飞片，即爆轰能量等于飞片的剪切能，因此有

$$E_s=m_0Q_V \tag{4}$$

式中：m_0 是飞片不能飞出时实验测得的最大装药质量，由(1)～(4)式可计算得到速度 v_0。

采用阻抗匹配法[10]，钢飞片以速度 v_0 撞击未反应炸药太安(密度 1.0 g/cm^3)，结合钢飞片和未反应炸药的 Hugoniot 曲线，可得到撞击时的压力与粒子速度，如图 3 所示，在 p-u 图上，作飞片的 Hugoniot 曲线镜面对称线[9]，镜面对称后曲线Ⅱ与 u 轴交于(v_0，0)，Ⅰ是未反应炸药的 Hugoniot 曲线。

认为冲击波波速和粒子速度间呈线性关系 $D=a+bu$，当初始速度为 0 以及初始压力可忽略时，由

冲击波界面介质的动量守恒方程有 $p=\rho_0 Du$,在撞击界面处压力连续条件 $p_f=p_t$,结合图 3 镜面对称几何条件:$v_0=v_f+v_t$,可得到撞击界面的速度 v_t 和压力 p。对于密度 1.0 g/cm^3 的太安采用冲击起爆能量判据公式[11]:

$$p_\tau^2\tau \geqslant K \tag{5}$$

式中:p_τ是冲击界面压力,K 是临界起爆判据常数,τ 是压力脉冲持续时间,由文献[10],

$$\tau=\frac{2d}{D_f} \tag{6}$$

式中:D_f是飞片中冲击波速度,由式(1)~(6)可得激发药药量与飞片冲击起爆能量值间的定量关系:

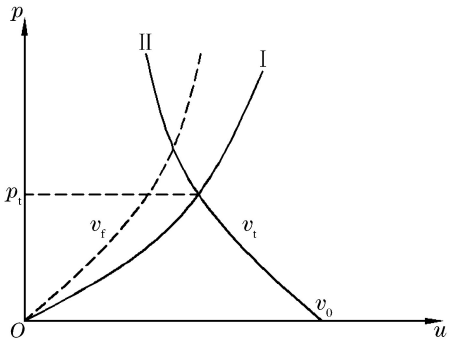

图 3 阻抗匹配图

Fig. 3 Impedance matching

$$\begin{cases} v_0=\sqrt{\dfrac{\frac{3}{4}mQ_V-m_0Q_V}{m/6+M/2}} \\ v_t=\dfrac{-B+\sqrt{B^2-4AC}}{2A} \\ p_t^2\tau=\left[\rho_{2,0}\left(a_2+b_2v_t\right)v_t\right]^2\dfrac{2d}{a_1+b_1v_t} \end{cases} \tag{7}$$

式中:$A=b_2\rho_{2,0}-b_1\rho_{1,0}$,$B=\rho_{2,0}a_2+\rho_{1,0}a_1+2\rho_{1,0}b_1v_0$,$C=-\rho_{1,0}a_1v_0-\rho_{1,0}b_1v_0^2$,$\rho_{1,0}$、$\rho_{2,0}$、$a_1$、$a_2$、$b_1$、$b_2$分别是钢飞片和未反应炸药的初始密度和对应的 Hugoniot 参数,d 是飞片厚度。

计算所用部分参数如表 2 所示,其中部分结果如表 3 和图 4 所示。

表 2 正向传爆计算所需参数表[12-14]

Table 2 Parameters for the calculation of positive detonation transmission

$\rho_{1,0}$/(g·cm^{-3})	$\rho_{2,0}$/(g·cm^{-3})	M/mg	m_0/mg	d/mm	a_1/(m·s^{-1})	a_2/(m·s^{-1})	b_1	b_2	γ
7.8	1.0	80	5	0.2	4000	300	1.58	1.78	3

表 3 不同药量下的部分计算结果

Table 3 Results with variable masses of charge increase

m/mg	v_0/(m·s^{-1})	p_τ/GPa	D_f/(m·s^{-1})	τ/ns	$p^2\cdot\tau$/(Pa^2·s)
7	171.3	0.10	4265.6	93.8	9.51×10^{8}
9	453.3	0.47	4 692.3	85.2	1.91×10^{10}
10	541.8	0.64	4 823.8	82.9	3.40×10^{10}
11	617.7	0.80	4 935.8	81.0	5.21×10^{10}
15	856.6	1.42	5 282.9	75.7	1.52×10^{11}
20	1 083.5	2.14	5 606.2	71.4	3.28×10^{11}
25	1 270.5	2.84	5 868.3	68.2	5.51×10^{11}
30	1 433.4	3.52	6 093.6	65.6	8.15×10^{11}
35	1 579.5	4.19	6 293.7	63.6	1.11×10^{12}
40	1 713.2	4.84	6 475.2	61.8	1.45×10^{12}
45	1 837.2	5.48	6 642.2	60.2	1.81×10^{12}
50	1 953.3	6.11	6 797.6	58.8	2.20×10^{12}

从图 4 和表 3 中可以看出,撞击速度、撞击后的压力以及撞击判据值均与药量呈正相关。对于密度为 1.0 g/cm^3 的太安,其临界起爆判据值 $K=5\times10^{10}$ Pa^2·s[10],由计算所得数据可知,对应的临界起爆药量为 11 mg,即只有激发药大于 11 mg 才可能起爆太安,实现稳定的正向传爆功能。

1.2.2 反向隔爆计算

当炮孔早爆,爆轰信号反向传至爆炸二极管底端的太安,然后太安产生爆轰并冲击压缩铅柱延期体,经铅柱延期体衰减的冲击波将不能起爆其后的导爆索,达到反向隔爆的目的。延期体的长度决定隔爆的效果,下面分析延期体长度与隔爆效果间的定量关系。采用一维模型,考虑到导爆索主要成分是低密度太安,以密度 1.0 g/cm^3 的太安代替导爆索,同时由于延期体药芯小且以燃烧传递火焰信号,把延期体处理为铅柱,忽略激发药和底部飞片的影响。太安起爆后给铅质延期体一个初始压力,经衰减后起爆其后的装药,模型如图 5 所示。

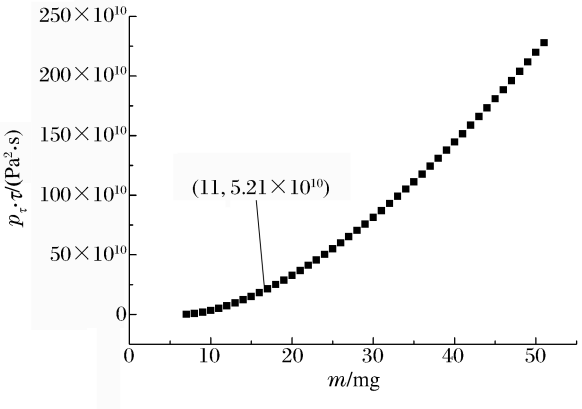

图 4 不同激发药药量下的冲击起爆能量值

Fig. 4 Shock initiation energy with variable masses of firing charge increase

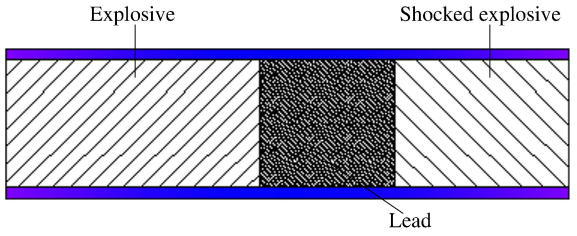

图 5 隔爆计算模型示意图

Fig. 5 Model for the calculation of stopping backward detonation

太安冲击压缩铅制延期体的初始速度为[9]:

$$v_{00}=\frac{D}{\gamma+1}\left[1-\frac{(\theta-1)\sqrt{2\gamma}}{\sqrt{(\gamma+1)\theta+\gamma-1}}\right] \tag{8}$$

式中:$\theta=p_{00}/p_j$,p_j 和 D 为低密度(1.0 g/cm^3)太安的爆压和爆速,结合铅柱的 Hugoniot 曲线 $D=a+bu$ 以及冲击波界面介质的动量守恒方程,经过迭代计算,得到铅柱初始透射压力 $p_{00}=15.56$ GPa,速度 $v_{00}=495$ m/s 采用黏弹塑性中介质指数衰减模型考察铅柱中冲击波参数[15-16]:

$$p_X=p_{00}\mathrm{e}^{-\alpha X},\quad v_X=v_{00}\mathrm{e}^{-\alpha X},\quad \alpha=\frac{\rho_{3,0}c_0}{2\eta} \tag{9}$$

式中:α 为衰减系数,与材料有关,η 为高压下金属的黏性常数,$\rho_{3,0}c_0$ 为波阻抗,X 为距离入射端的距离,p_X 为此处的压力,结合铅柱 Hugoniot 曲线以及式(8)~(13)即可以求出延期体长度与隔爆效果的定量关系:

$$\begin{cases} v_0=\dfrac{-\rho_{3,0}a_3+\sqrt{(\rho_{3,0}a_3)^2-4b_3\rho_{3,0}p_X}}{2b_3\rho_{3,0}}+v_X \\ v_t=\dfrac{-B+\sqrt{B^2-4AC}}{2A} \\ p_t^2\tau=[\rho_{4,0}(a_4+b_4v_t)v_t]^2\dfrac{2X}{a_3+b_3v_t} \end{cases} \tag{10}$$

式中:$A=b_4\rho_{4,0}-b_3\rho_{3,0}$,$B=\rho_{4,0}a_4+\rho_{3,0}a_3+4\rho_{3,0}b_3v_0$,$C=-\rho_{3,0}a_3v_0-4\rho_{3,0}b_3v_0^2$,$\rho_{3,0}$、$\rho_{4,0}$、$a_3$、$a_4$、$b_3$、$b_4$ 分别是铅和未反应炸药的初始密度和对应的 Hugoniot 参数,p_τ 为撞击后压力,计算所用部分参数如表 4 所示,其中部分结果如表 5 和图 6 所示。

表 4 反向隔爆计算所需参数表[12-14,17-18]

Table 4 Parameters for the calculation of stopping backward detonation

$\rho_{3,0}$/(g·cm^{-3})	$\rho_{4,0}$/(g·cm^{-3})	η/(Pa·s)	p_j/GPa	c_0/(m·s^{-1})	a_3/(m·s^{-1})	a_4/(m·s^{-1})	b_3	b_4	γ
11.34	1.0	17 000	8.7	2 029	2 028	300	1.52	1.78	3

从表 5 中可以看出,撞击前速度 v_X、撞击后压力 p_τ 随着延期体长度增加而降低。结合图 6 中在 2.3 mm时冲击起爆能量值为 4.99×10^{10} Pa^2·s,对比起爆阈值常数 $K=5\times10^{10}$ Pa^2·s[10] 可知,当延期体长度小于 2.3 mm 后,将不能隔爆,即只有延期体长度超过 2.3 mm 才能可靠反向隔爆。

表 5 不同延期体长度下的计算结果

Table 5 Results with the variable lengths of the delay elements increase

X/mm	v_X/(m·s^{-1})	p_τ/GPa	D_f/(m·s^{-1})	τ/μs	$p_\tau^2\cdot\tau$/(Pa^2·s)
0.5	353.0	1.040	3 069.8	0.33	3.54×10^{11}
1.0	251.7	0.614	2 802.0	0.71	2.69×10^{11}
1.5	179.5	0.364	2 598.8	1.15	1.53×10^{11}
2.0	128.0	0.217	2 446.2	1.64	7.72×10^{10}
2.2	111.8	0.177	2 396.6	1.84	5.78×10^{10}
2.3	104.5	0.161	2 374.0	1.94	4.99×10^{10}
2.5	91.2	0.132	2 332.6	2.14	3.71×10^{10}
3.0	65.1	0.081	2 248.8	2.67	1.76×10^{10}
3.5	46.4	0.051	2 187.4	3.20	8.33×10^{9}
4.0	33.1	0.033	2 142.7	3.73	4.01×10^{9}
4.5	23.6	0.022	2 110.3	4.26	1.97×10^{9}
5.0	16.8	0.014	2 087.0	4.79	9.83×10^{8}

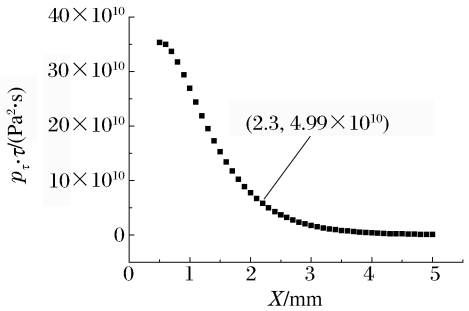

图 6 不同延期体长度下冲击起爆能量值

Fig. 6 Shock initiation energy with length of delay elements increase

2 实　验

2.1 激发药的极限药量

利用正反对称结构装药(见图 7)实验来测定激发药极限药量,该结构由两个爆炸二极管完全对称组装而成,任选一个爆炸二极管作为正向起爆端,另外一个则同时作为反向隔爆设计实验。激发信号由导爆索(或者导爆管)输入第一个管壳中,如果信号能顺利起爆第二个管壳装药,则说明能正向可靠传爆,否则即为正向传爆失败,如果能量不能在第二段管壳出口端处的导爆管或者导爆索传递,说明可靠隔爆。选用图 7(b)结构,固定延期体长度为 5.50 mm,调整激发药药量,实验 10 发。图 8 (a)显示第 1 段管壳内的太安出现拒爆或者半爆,在实验中可以看到在撕裂的管壳壁上有白色太安颗粒,代表正向传爆失败;如图 8(b)所示,在缠红色胶带的隔爆端,第 2 段管壳已经完全碎裂,输出导爆管的颜色未发生变化而且管中的药粉完好无损,代表隔爆成功。

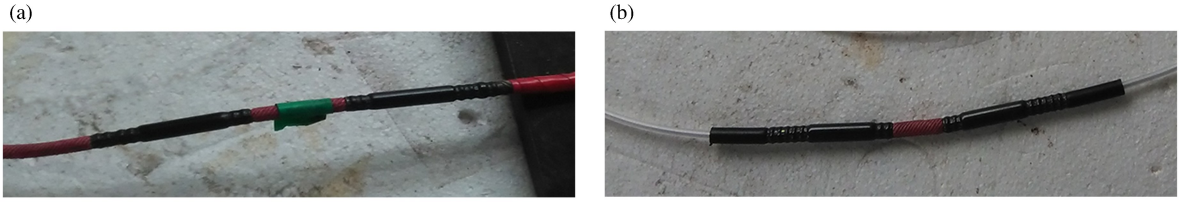

图 7 正反对称装药结构

Fig. 7 Symmetrical charge structures

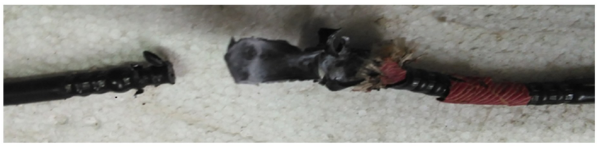

图 8(a) 正向传爆失败

Fig. 8(a) Failing transmitting for positive detonation

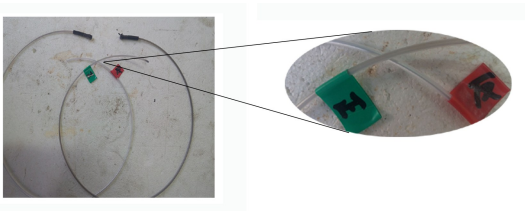

图 8(b) 正向成功传爆反向隔爆成功

Fig. 8(b) Successful transmitting for positive detonation and stopping backward detonation

实验结果如表 6 所示,当激发药少于 5 mg 时,不能产生飞片;药量低于 20 mg 时,会出现正向传爆失败;药量大于 20 mg 时,则传爆率为 100%;传爆成功率随着激发药的质量呈正相关,这与计算中激发药质量增加判据值也增加、更容易起爆具有一致性。虽然实验得到的激发药极限药量为 20 mg,对比理论计算中在阈值 $K=5\times10^{10}$ Pa$^2\cdot$s[10] 对应的 11 mg,实验结果偏大。但是计算所取的阈值是 50%爆轰的对应值,而实验所测得是 100%传爆时候的最小药量。同时实验所测定的 40%隔爆率对应药量为 12 mg,此时与计算值 11 mg 基本一致。即正向起爆过程中,计算结果与实验结果有较好的一致性,爆炸二极管正向传爆合理可行。

表 6 不同激发药药量下的正向传爆率和反向隔爆率

Table 6 Percentages of transmission for positive detonation and stopping backward detonation with mass of firing charge increase

激发药药量/mg	延期体长度/mm	实验次数	正向传爆率/%	反向隔爆率/%	说明
50	5.50	10	100	100	当激发药药量为 5 mg 时,将不能爆轰产生飞片
40	5.50	10	100	100	
30	5.50	10	100	100	
20	5.50	10	100	100	
15	5.50	10	60	60	
12	5.50	10	40	40	
10	5.50	10	0	0	
5	5.50	10	0	0	

2.2 延期体的临界尺寸

图 9(a)中第 1 段管壳为导爆管激发装置,激发第 2 段管壳中的导爆索,第 2 段管壳即对应于导爆索输入的正向传爆实验,爆轰信号传入第 3 段管壳(与第 2 段管壳对称装药),从图 9(b)中可以看出隔爆段管壳末端的导爆索没有被起爆,隔爆成功。调整延期体长度,结果如表 7 所示。

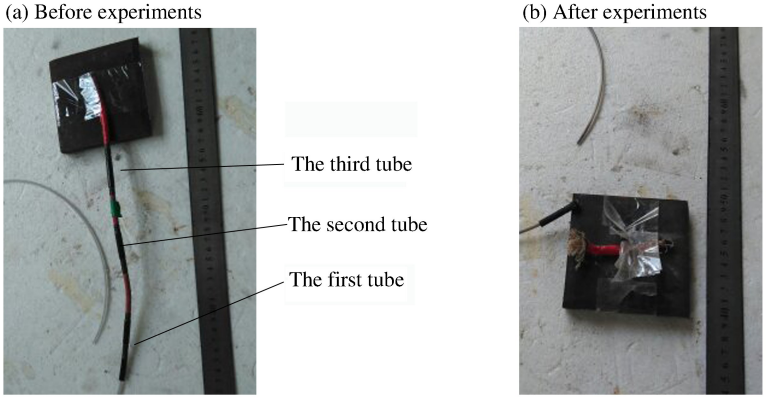

图 9 反向隔爆正反对称实验

Fig. 9 Experiments about reliability in which both of input and output are detonating fuse

表 7 不同延期体长度的隔爆率

Table 7 Percentage of stopping backward detonation with length of delay elements increase

第 3 段管壳装药/mg	延期体长度/mm	试验次数	隔爆率/%
20	6.00	10	100
20	5.00	10	100
20	4.50	10	100
20	4.30	10	100
20	4.20	10	100
20	4.10	10	40
20	4.00	10	0

从表 7 可知,20 mg 装药下延期体临界长度为 4.20 mm。调整装药,得到不同药量激发药的临界尺寸如图 10 所示:激发药对延期体的临界尺寸没有影响,影响反向隔爆可靠性的主要因素是太安(密度 1.0 g/cm^3),而激发药在小药量下对其没有影响,证明隔爆计算中忽略激发药的可行性。对比计算所得的2.30 mm,偏大的原因主要有两点:一是4.20 mm 是 100% 隔爆率下的临界尺寸,2.30 mm 是计算 50%的隔爆率所得,所以计算值小;二是计算采用的简化模型没有考虑飞片撞击影响,由炸药直接作用在铅制延期体上,忽略了飞片撞击增压[16]的影响,必然会削弱撞击压力,使计算所得结果小。

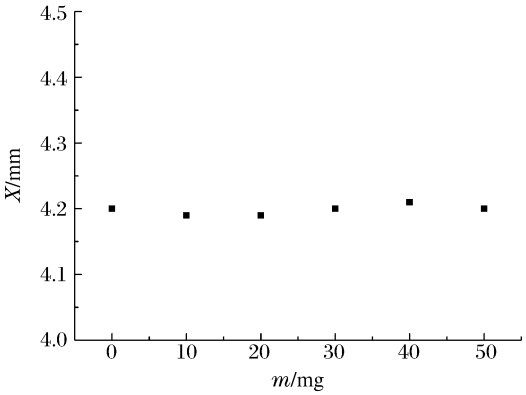

图 10 不同药量下延期体临界尺寸

Fig. 10 Critital length of delay elements of variable mass of firing charge

正向传爆计算和极限药量结果一致性较好,而反向隔爆计算虽然和实验数据有偏差,但是均能说明合适长度延期体能可靠隔爆。实验与计算均证明所设计的爆炸二极管能实现正向传爆、反向隔爆的目的。

3 结　论

(1)设计了一种新型爆炸二极管,利用正向冲击起爆,反向延期体衰减冲击波的机理,能够实现可靠的正向传爆和反向隔爆的功能。

(2)理论计算和实验均证明激发药药量存在极限值,而且实验值和理论计算值一致,考虑安全指数,在工程上推荐采用 30～40 mg 药量。

(3)反向隔爆的可靠性和延期体长度有关,实验和计算值对比给出,延期体至少长 4.20 mm 才能实验室条件下 100%隔爆,而且小药量激发药对于延期体临界尺寸几乎没有影响。考虑安全指数的作用,在工程中推荐使用 5.5 mm 左右长度的延期体。

参考文献:

[1] 王付景.论城市控制爆破中的安全管理[J].低碳世界,2015(23):264-265.
Wang Fujing. The safety management in the urban controlled blasting[J]. Low Carbon World, 2015(23):264-265.

[2] 王飞,马宏昊,沈兆武.一种应用于高温火区爆破中的不可逆起爆网路的耐温与传爆性能[J].含能材料,2016,24(1):106-110.
Wang Fei, Ma Honghao, Shen Zhaowu. Heat resistance and explosive transfer performance in the irreversible detonating network applied in high temperature mine blasting[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016,24(1):106-110.

[3] 田程.防控早爆引起群死群伤事故分析及应急预案[J].现代矿业,2011(6):93-94.

Tian Cheng. The accident analysis and contingency plans about death and injury caused by premature explosion[J]. Express Information of Mining Industry, 2011(6):93-94.

[4] 张艳.一起离奇露天早爆事故原因分析[C]//中国爆破器材行业协会乳化炸药安全技术交流会论文集.昆明,2013:78-80.

[5] 张杰,郝新民,马伟.高温炮孔爆破的安全处理探讨[J].工程爆破,2013,19(1):102-104.
Zhang Jie, Hao Xinmin, Ma Wei. Discussion on the safe disposal of the high temperature hole blasting[J]. Engineering Blasting, 2013,19(1):102-104.

[6] 宋庆刚,李迎.层次分析法在早爆事故中的应用[J].采矿技术,2014(5):154-156.
Song qingang, Li ying. The application of AHP in premature blasting[J]. Mining Technology, 2014(5):154-156.

[7] 沈兆武,马宏昊.小直径低线密度装药的导爆索或雷管延期线的制作方法:CN101556130 A[P]. 2009-10-14.

[8] 张宝平,张庆明,黄风雷.爆轰物理学[M].北京:兵器工业出版社,2001:265-319.

[9] 金韶华.炸药理论[M].西安:西北工业大学出版社,2010:19-20.

[10] 章冠人,陈大年.凝聚炸药起爆动力学[M].北京:国防工业出版社,1991:90-109.

[11] Walker F E, Wasley R J. Critical energy for shock initiation of heterogeneous explosives[J]. Explosive Stoffe, 1969,17(1):9.

[12] 奥尔连科 Л Л.爆炸物理学[M].孙承纬,译.北京:科学出版社,2011:1301-1331.

[13] Seay G E, Seely Jr L B. Initiation of a low-density PETN pressing by a plane shock wave[J]. Journal of Applied Physics, 1961,32(6):1092-1097.

[14] Stirpe D, Johnson J O, Wackerle J. Shock initiation of XTX-8003 and pressed PETN[J]. Journal of Applied Physics, 1970,41(9):3884-3893.

[15] 王作山,刘玉存,郑敏,等.爆轰冲击波在有机隔板中衰减模型的研究[J].应用基础与工程科学学报,2001,9(4):316-319.
Wang Zuoshan, Liu Yucun, Zheng Min, et al. Study on the attenuating model of detonation shock wave in the PMMA gap[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2001,9(4):316-319.

[16] 王礼立.应力波基础[M].北京:国防工业出版社,2005:154-155.

[17] Green L G, Lee E L. Detonation pressure measurements on PETN[C]//Proceedings of 13th International Detonation Symposium. America: Norfolk, 2006:1141-1150.

[18] Mineev V N, Mineev A V. Viscosity of metals under shock-loading conditions[J]. Le Journal de Physique IV, 1997,7(C3):583-585.

A new type of explosive diode and its mechanism

Cui Yu, Ma Honghao, Shen Zhaowu, Wang Fei, Hong Yong, Wang Luqing

(*CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *Anhui*, *China*)

Abstract: In the present work, to address the premature explosion for the detonating network, we designed a new type of irreversible detonation explosive diode and studied the mechanism and limiting factors about the explosive diode in transmitting the positive detonation and stopping the backward detonation, using the calculation and experiments of the symmetrical charge structure. The results show that the new type of explosive diode can achieve this aim and that the maximum amount of the firing charge and the crucial length of the delay elements from the theoretical calculation are fairly consistent with those from the experiments.

Keywords: explosive diode; mass limited of firing charge; crucial length; delay elements

(责任编辑 曾月蓉)