

文章编号: 1006-9941(2017)04-0266-07

## 爆炸二极管的数值模拟设计

崔宇<sup>1,2</sup>, 马宏昊<sup>1,2</sup>, 沈兆武<sup>1,2</sup>, 任丽杰<sup>1,2</sup>, 杨明<sup>1,2</sup>, 余勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 针对工业上起爆网路早爆问题, 采用数值模拟方法设计并研制了一种具有单向传爆功能的爆炸二极管。利用点火增长模型结合 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 通过调整激发药药量方式进行了正向冲击起爆模拟, 采用调整延期体长度进行反向隔爆仿真模拟, 最后通过正反对称实验以及飞片测速实验进行可行性验证。结果表明: 该爆炸二极管可以正向稳定传递爆轰信号以及反向可靠阻断爆轰信号, 而且激发药药量和延期体长度有一定范围值, 其中激发药药量大于 30 mg, 而 30 mg 激发药药量下延期体长于 4.0 mm。

**关键词:** 爆炸二极管; 冲击起爆; 阻爆; 激发药; 线延期体

**中图分类号:** TJ45

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.04.001

### 1 引言

工程爆破随着经济发展而起步、发展、壮大并且在采矿、交通等领域取得了巨大的经济效益<sup>[1]</sup>, 工程中发生的事故, 特别是炮孔、起爆网路的早爆、误爆问题严重危害了工人生命安全并延误工程进度, 这促使研究人员密切关注爆破安全技术<sup>[2-3]</sup>。张英梅<sup>[4]</sup>等对煤矿井下的杂散电流进行数学建模, 分析了杂散电流引发雷管早爆的机理。龙昌军<sup>[5]</sup>等在拆除爆破中采用隔热结构来防止高温导致的炮孔早爆。曹春杰<sup>[6]</sup>等为防止高温火区环境中炮孔早爆, 将雷管和炸药进行隔热处理。束学来<sup>[7]</sup>等提出耐热炸药以应对高温环境下的早爆问题。

上述研究多是采用隔热保护手段来防止早爆问题, 并没有提出一种针对起爆网路安全性的手段。如果能设计出一种装置: 当激发信号从主网络正向传递过来能顺利起爆炮孔装药, 而单个炮孔装药早爆, 误爆的激发信号不能传递给主网络, 不会引起整个起爆网

路的起爆, 这将极大降低事故损失。王飞<sup>[3]</sup>等设计一种利用不同感度多级装药结构的单向起爆元件, 结构较为复杂且利用钝感炸药作为隔爆材料保护起爆网路也会引发新的安全问题。为此, 本研究设计了一种简单易行的爆炸二极管, 该结构利用飞片冲击起爆实现正向传爆, 利用炸药在铅质线延期体<sup>[8]</sup>元件处爆炸时, 透射冲击波反向隔爆。同时采用数值计算以及实验针对该爆炸二极管的激发药药量以及延期体长度等关键因素进行了分析。

### 2 爆炸二极管的仿真设计

#### 2.1 爆炸二极管的结构

设计的爆炸二极管结构如图 1 所示, 爆轰信号从起爆网络主网路导爆索输入, 经由延期体、激发药, 剪

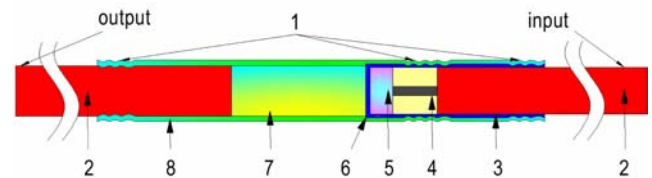


图 1 爆炸二极管的结构图

1—固定处, 2—导爆索, 3—内帽, 4—延期体, 5—激发药, 6—定位台阶, 7—传爆药, 8—管壳

Fig. 1 The structure of the explosive diode

1—fixed points, 2—detonating fuse, 3—internal cylinder, 4—delay element, 5—firing charge, 6—step positioned, 7—booster charge, 8—tube

收稿日期: 2016-07-18; 修回日期: 2016-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(51374189); 中央高校基金科研业务费专项资金(WK6030000003); 金属矿山安全与健康国家重点实验室开放课题(Jskszdsys-2015-03)

作者简介: 崔宇(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸与冲击, 工程防护等方面研究。e-mail: cuiyu111@mail.ustc.edu.cn

通信联系人: 马宏昊(1980-), 男, 副教授, 主要从事爆炸与冲击, 冲击防护等研究。e-mail: hhma@ustc.edu.cn

切内帽底部形成高速飞片,撞击传爆药,最后传递给输出端导爆索,最终起爆炮孔装药。当炮孔装药意外起爆时,爆轰信号从输出端导爆索逆向输入,经由传爆药起爆激发药,最后冲击压缩铅质延期体,虽然会点燃延期体中药柱,但是能量已经不足以起爆输出端导爆索,必然可以在主网络之外阻断爆轰信号,达到隔爆的目的。其中延期体、内帽、管壳外力挤压固连,输入端、输出端导爆索也与管壳固连。

### 2.2 正向传爆中激发药极限药量仿真设计

针对图1设计的爆炸二极管,现在采用点火增长模型<sup>[9]</sup>结合LS-DYNA软件,对激发药药量进行正向传爆稳定性分析。

激发药采用高能燃烧计算模型和JWL状态方程<sup>[10]</sup>,如式1所示。

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) + \frac{\omega E}{v} \quad (1)$$

式中, $p$ 为爆轰压力,GPa,具体参数如表1所示,激发药为太安(PETN)。

表1 激发药爆轰参数<sup>[10]</sup>

Table 1 The detonation parameters of firing charge<sup>[10]</sup>

| $\rho$<br>/g · cm <sup>-3</sup> | $D$<br>/km · s <sup>-1</sup> | $P_{CJ}$<br>/GPa | $A$   | $B$   | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ |
|---------------------------------|------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0.88                            | 5.17                         | 6.2              | 3.486 | 0.113 | 7.0   | 2.0   | 0.24     |

内帽与壳体为钢材料,密度为7.83 g · cm<sup>-3</sup>,在正向传爆模拟中可以将延期体处理为封闭端与壳体固连。传爆药采用JWL状态方程以及Lee&Traver三项式点火与增长反应速率模型<sup>[11]</sup>。该模型可以反映受冲击的炸药内部的爆轰发展过程,具体形式如式2所示。

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z \quad (2)$$

式中, $\lambda$ 为反应度,即为炸药的反应百分数, $I$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $g$ 、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 为可调参数,采用1.64 g · cm<sup>-3</sup>的TNT作为传爆药,具体参数如表2所示。

表2 TNT点火与增长反应速率模型参数<sup>[12]</sup>

Table 2 Ignition and Growth reactive flow model parameters for TNT<sup>[12]</sup>

| $I$ | $G_1$ | $G_2$ | $a$ | $b$   | $c$ | $d$   | $e$ | $g$   | $x$ | $y$ | $z$ |
|-----|-------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-----|-----|
| 50  | 360   | 100   | 0   | 0.667 | 1.0 | 0.667 | 1.0 | 0.111 | 4   | 1.2 | 1   |

采用1/4模型计算,建模单位g-cm- $\mu$ s,简化模型如图2所示。由于涉及炸药大变形,采用Lagrange方法出现网格畸变,计算失败,所以采用ALE方法。激发药(50 mg时109512个单元)、传爆药(298480个单元)和空气域(435136个单元)采用ALE网格,内帽(20176个单元)与壳体(113464个单元)采用Lagrange网格,两种网格间采用流固耦合算法,内帽与壳体间共节点作用。均为映射六面体网格,共976768个单元。

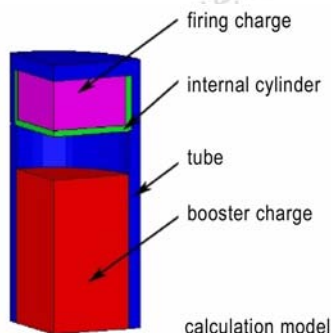


图2 正向传爆计算结构模型

Fig. 2 The calculation model for transmitting positive detonation

调整激发药药量10,20,30,40,50 mg,控制传爆药长度均为5 mm,飞片厚0.2 mm,壳体壁厚0.4 mm,自上而下起爆。其中50 mg药量模拟过程如图3所示(1)激发药的起爆;(2)高速飞片生成;(3)飞片撞击传爆药;(4)传爆药中爆轰发展。图4、图5分别为50,10 mg激发药时传爆药中轴线上爆轰发展过程。对比两图,可以看出随着距撞击面长度的增长,压力均是先增大。3.3  $\mu$ s之后,50 mg药量下传爆药的峰值压力维持18 GPa左右,对比1.64 g · cm<sup>-3</sup>的TNT的C-J压力约21 GPa<sup>[12]</sup>,判定传爆成功;而10 mg药量下,峰值压力在4.2  $\mu$ s后反而开始降低,爆轰信号衰减,且轴线上峰值中最大值为5.2 GPa,远小于C-J压力,判定传爆失败。表明激发药药量决定了正向传爆的稳定性。

不同激发药药量结果见表3。由表3可见,随着激发药药量的增大,飞片最大速度逐步递增,飞片撞击传爆药的初始压力也在递增,传爆药药柱中的最大压力也在逐步递增。当撞击压力达到6.3 GPa时,可以看到传爆药药柱完全爆轰,峰值压力达到18.6 GPa,

此时峰值对应的位置为距离撞击端面 2.6 mm。而当药量小于 10 mg 时,压力峰值将会在 4.7 mm 后出现衰减,即爆轰信号衰减传爆失败。可知,当激发药药量大于 50 mg,传爆药完全爆轰,小于 10 mg 传爆失败。

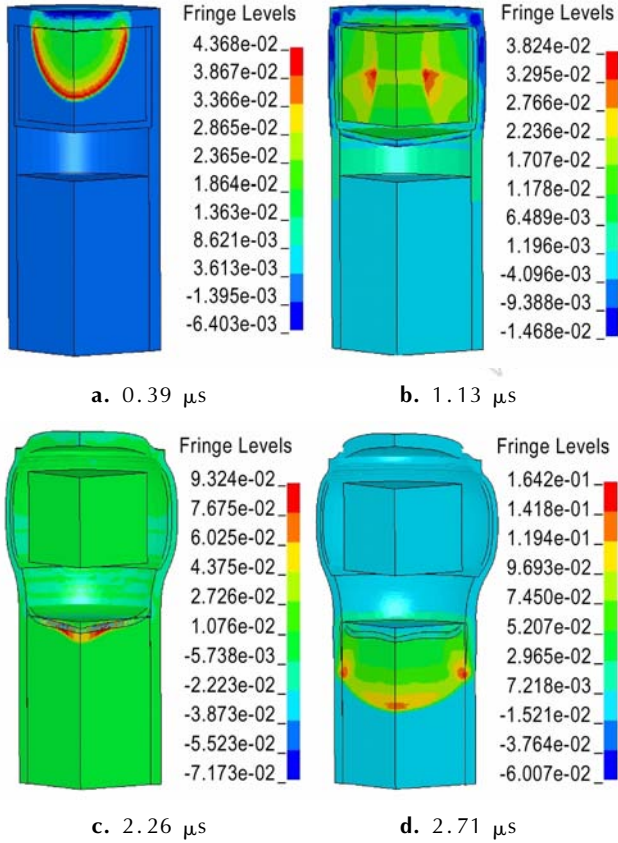


图 3 50 mg 激发药下的计算过程  
Fig. 3 The calculation process under the 50 mg firing charge

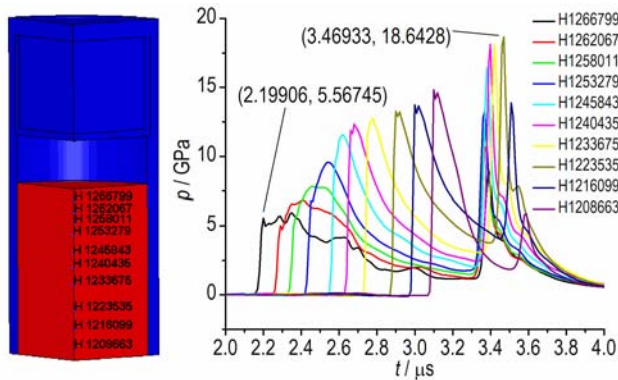


图 4 50 mg 激发药下的爆轰成长过程  
Fig. 4 The detonation development process under the 50 mg firing charge

### 2.3 反向隔爆中延期体的临界尺寸仿真设计

反向隔爆设计中,铅质延期体起主要隔爆作用。与正向传爆的顺序相反,当炮孔意外引爆时,会将传爆

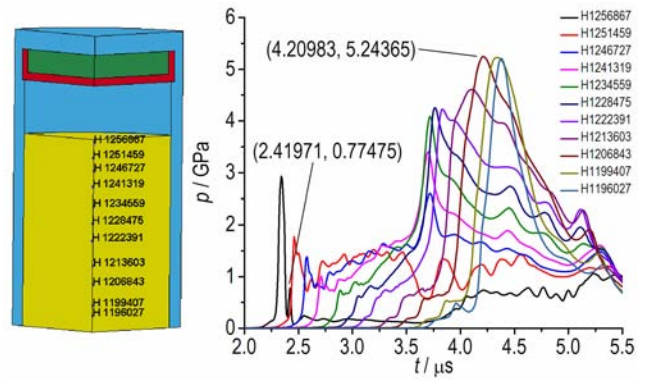


图 5 10 mg 激发药下的爆轰成长过程  
Fig. 5 The detonation development process under the 10 mg firing charge

表 3 不同激发药药量下的计算物理量

Table 3 The calculated physical quantity with the various mass of firing charge

| mass of firing charge /mg | maximum velocity of flying planes /m · s <sup>-1</sup> | collision pressure /GPa | pressure peak /GPa | peak position /mm |
|---------------------------|--|-------------------------|--------------------|-------------------|
| 10                        | 900  | 1.4                     | 5.3                | 4.7               |
| 20                        | 1140   | 2.0                     | 10.2               | 5.0               |
| 30                        | 1230   | 2.9                     | 13.3               | 5.0               |
| 40                        | 1500   | 4.2                     | 14.4               | 5.0               |
| 50                        | 1550   | 6.3                     | 18.6               | 2.6               |

药起爆,传爆药将会反向冲击压缩内帽起爆激发药,最后一起冲击压缩铅质延期体。采用如图 6 的 1/4 简化模型,建模单位 g-cm-μs,仍采用 ALE 方法。输入端导爆索(25350 个单元)与激发药(8112 个单元)均被简化为带有点火与增长反应速率模型(表 2 所示)的 TNT<sup>[12]</sup>,5 mm 长传爆药(25350 个单元)则直接采用高能炸药燃烧模型以及 JWL 状态方程<sup>[12]</sup>。内帽、延期体、壳体采用共节点方式固连在一起,采用 Lagrange 网格,炸药与空气则采用 ALE 网格,两者之间采用流

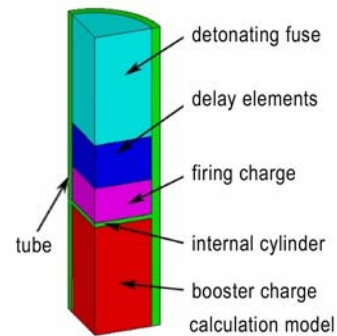


图 6 反向隔爆计算结构模型  
Fig. 6 The calculation structure model for stopping back-ward detonation



固耦合算法,延期体铅(5 mm 下为 25350 个单元)使用 SCG 模型<sup>[13]</sup>,具体参数如文献[13]所示,所有网格均为映射六面体网格,共 181428 个单元。

控制激发药 30 mg,调节延期体长度为 1.0,2.0,3.0,4.0,5.0 mm,自下而上起爆。其中延期体 1.0 mm 时的计算过程如图 7 所示:(1)传爆药爆轰,作为反向爆轰输入信号;(2)内帽中装药起爆;(3)延期体变形;(4)、(5)输入端装药的爆轰发展过程。

图 8、图 9 分别为 1、5 mm 延期体时,轴线上激发药(虚线)和输入端装药(实线)的爆轰发展过程。对比发现,激发药压力均近似 15 GPa,说明激发药直接被起爆。而 1 mm 下输入端装药压力也达到 15 GPa,说明该处装药也被起爆,隔爆失败;5 mm 时输入端装药却由于初始压力仅有 2.4 GPa,而逐步衰减至熄爆说明隔爆成功。这是因为内帽底仅 0.2 mm 厚,远小于延期体长度。表明:延期体长度对隔爆起决定性作用。

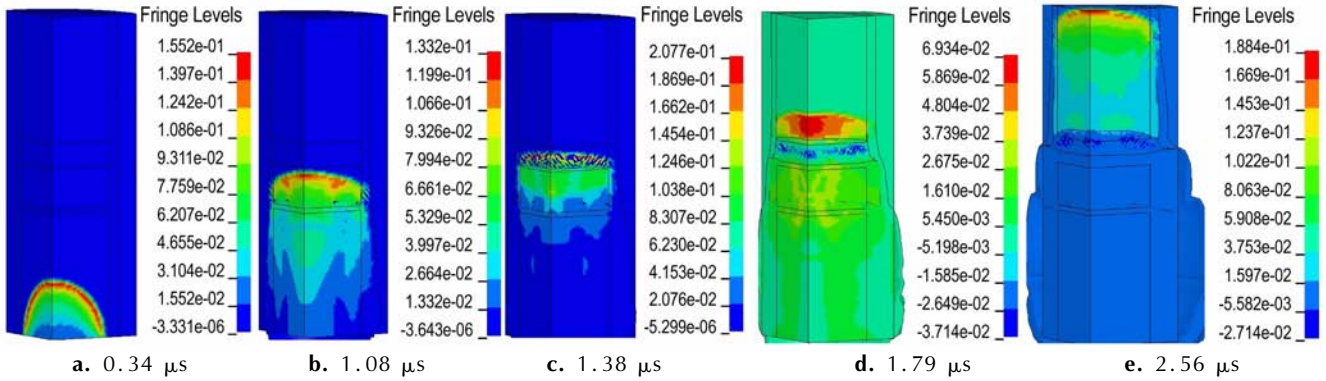


图 7 1.0 mm 延期体下的计算过程

Fig.7 The calculation process under the 1.0 mm delay element

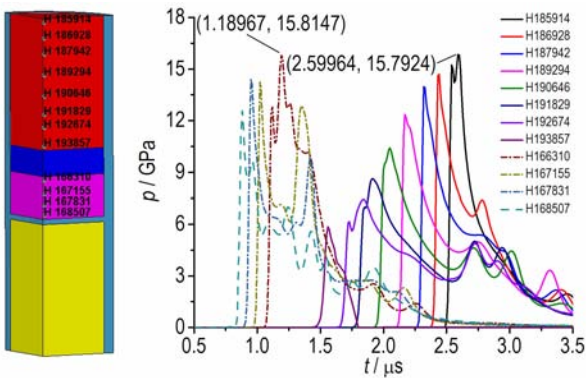


图 8 1 mm 延期体下的爆轰成长过程

Fig. 8 The detonation development process under the 1.0 mm delay element

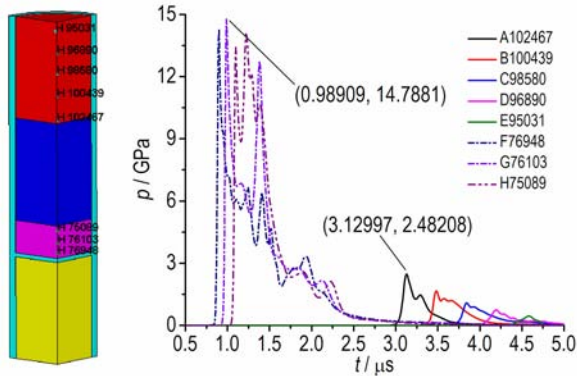


图 9 5 mm 延期体下的爆轰成长过程

Fig. 9 The detonation development process under the 5.0 mm delay element

结果如表 4 所示:随着延期体长度增加,激发药初始压力基本不变,且均直接爆轰而输入端装药初始压力则逐步降低,输入端装药中的压力峰值也由 15.8 GPa 降到 2.5 GPa,峰值出现的位置也由距撞击端面 5 mm 至撞击端面上。可以看出延期体铅柱长度低于 4 mm 不能隔爆,5 mm 以上可以反向阻爆。

表 4 不同延期体长度下的计算物理量

Table 4 The calculated physical quantity with the various length of the delay elements

| length of delay elements /mm | initial pressure in charge /GPa | maximal velocity of delay elements /m · s <sup>-1</sup> | collision pressure /GPa | pressure peak /GPa | peak position /mm |
|------------------------------|---------------------------------|---|-------------------------|--------------------|-------------------|
| 1.0                          | 14.8                            | 870   | 5.86                    | 15.8               | 5.0               |
| 2.0                          | 14.6                            | 750   | 4.93                    | 14.3               | 5.0               |
| 3.0                          | 14.5                            | 648   | 3.71                    | 11.6               | 5.0               |
| 4.0                          | 14.7                            | 533   | 3.02                    | 5.7                | 2.6               |
| 5.0                          | 14.7                            | 427   | 2.48                    | 2.5                | 0                 |

### 3 实验

#### 3.1 正反对称验证实验

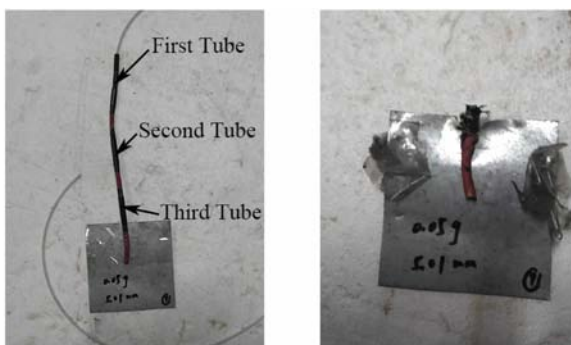
考虑到正向传爆以及反向隔爆本身具有对称性,

而且同时进行正反实验简单高效、节省材料以及对比鲜明,所以本文设计一种对称装药结构验证模拟结果以及设计的可行性。如图 10 所示整体结构左右对称,可以任选一端如 A 作为输入端,则另外一端为输出端。从 A 输入爆轰信号,经由延期体、激发药、传爆药,信号传递到 B 管壳中,对应正向传爆试验;在 B 管壳中经由传爆药、激发药、延期体,对应反向隔爆实验。如图 11a 所示,第一段管壳为爆轰信号发生器,产生爆轰信号输入第二段管壳,其中第二段管壳与第三段管壳为对称装药结构,第三段管壳后的导爆索绑在验证板上,为薄铁板。PETN 作为激发药不如 RDX<sup>[14]</sup> 故采用 50 mg 的低密度 RDX,考虑工程上可靠因子的作用,传爆药采用 PETN( $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )长度为 10.0 mm,延期体长度约 5.0 mm。引爆爆轰信号发生器,结果如图 11b 所示,第二段管壳完全爆轰,第三段管壳碎裂至延期体位置,验证板基本完好,最后的输出端导爆索也完好。重复实验 10 次,结果均如此。对比模拟结果 50 mg 激发药正向稳定传爆,5 mm 延期体反向可靠隔爆,实验验证了模拟结果,而且实验的重复性好,结果可信,即设计的爆轰二极管能达到正向稳定传爆反向可靠隔爆的效果。



图 10 对称装药结构

Fig. 10 The symmetrical charge structure



a. before experiment      b. after experiment

图 11 实验前后对照图

Fig. 11 Comparison diagrams of before and after the experiment

### 3.2 飞片速度测量

由表 3 数据可以看出,飞片速度与激发药药量、撞击压力等呈正相关。而且由炸药对飞片的一维抛射理

论<sup>[15]</sup>有:

$$\bar{V}_m = \frac{V_m}{D} = 1 - \frac{1}{\eta} [(1+2\eta) - 1] \quad (4)$$

式中,  $V_m$  为飞片的极限速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\eta = 16m / (27M)$ ,  $D$  为炸药爆速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 利用公式(4)对  $\eta$  求导得:

$$\frac{d\bar{V}_m}{d\eta} = \frac{1}{\eta^2} \left[ \frac{1+\eta}{\sqrt{1+2\eta}} - 1 \right] \quad (5)$$

对(5)式恒大于零,也表明当飞片质量不变时随着装药质量的增大,飞片的速度越大。由此可以通过测量飞片速度来反映不同激发药药量下的起爆能量。采用断通法<sup>[16]</sup>,装置如图 12 所示,去除传爆药,激发药爆轰剪切内帽形成飞片,飞片打穿双面铝箔时产生一个电信号,由两个电信号间的时间差与两层双面铝箔间的距离即可得到飞片速度。结果如表 5 所示。随着激发药药量增大,飞片速度先升高再降低,与数值计算结果以及理论有一定差距。分析如下:一方面由于激发药并不是直接爆轰而是燃烧转爆轰,以及空气阻力的影响,必然会使实际测量结果偏小;另一方面由于飞片被打碎以及壳体破裂,侧向稀疏波的影响,也会导致速度偏小,正如图 13 所示,分别代表药量由 10 mg 增加到 50 mg, 1# ~ 5# 飞片破损越严重,壳体侧向膨胀和破碎越明显。

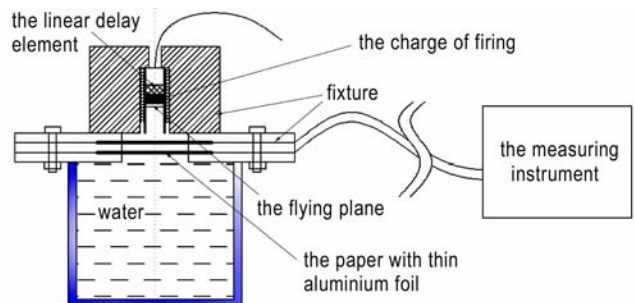


图 12 测速实验装置图

Fig. 12 The measuring equipment of detecting velocity

表 5 不同药量下的飞片速度

Table 5 The velocity of flying planes with the various mass of firing charge

| mass of firing charge/mg | length of the delay element/mm | average velocity of flying planes/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|--------------------------|--------------------------------|--|
| 10                       | 5.51                           | 0.79   |
| 20                       | 5.51                           | 1.03   |
| 30                       | 5.52                           | 1.2  |
| 40                       | 5.49                           | 0.97   |
| 50                       | 5.50                           | 0.98   |



图 13 不同药量下收集到的管壳和飞片

Fig. 13 The tubes and flying planes collected with the various mass of firing charge

## 4 结 论

(1) 通过数值模拟与正反对称装药实验相结合的方法设计了一种爆炸二极管,实现了正向稳定传爆,反向可靠隔爆的目标。

(2) 模拟结果显示,当药量大于 50 mg,激发药正向稳定传爆,小于 10 mg 则会传爆失败;30 mg 激发药药量下,延期体长度小于 4 mm 时,反向隔爆失败,大于 5 mm 时可以可靠隔爆。实验结果显示 50 mg 激发药,5 mm 延期体可以达到 100% 整体成功率。

(3) 飞片测量结果显示,由于激发药燃烧转爆轰、空气阻力壳体飞片碎裂等影响,飞片速度较模拟值偏低,但是仍可以看出 10 mg 激发药速度只有  $790 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,必然会导致正向传爆失败。

### 参考文献:

- [1] 冯叔瑜,郑哲敏. 让工程爆破技术更好地服务社会、造福人类——我国工程爆破 60 年回顾与展望[J]. 中国工程科学, 2014(11): 5-13.  
FENG Shu-yu, ZHENG Zhe-ming. Let the engineering blasting technology serving for society and benefit of mankind better; Sixty years of engineering blasting in China, review and prospect [J]. *Engineering Science*, 2014(11): 5-13.
- [2] 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 Fu-jing. The safety management in the urban controlled blasting[J]. *Low Carbon World*, 2015(23): 264-265.
- [3] 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 Hong-hao, SHEN Zhao-wu. Heat resistance and explosive transfer performance in the irreversible detonating network applied in high temperature mine blasting[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(1):

106-110.

- [4] 张英梅,袁晓光. 煤矿井下直流牵引网络中杂散电流分布[J]. 太原理工大学学报, 1998(3): 237-239.  
ZHANG Ying-mei, YUAN Xiao-guang. The stray current distribution in DC traction power supply system in the coal mine[J]. *Journal of taiyuan university of technology*, 1998(3): 237-239.
- [5] 龙昌军,农青凤,梁建铭,等. 硅锰冶炼炉炉底凝结物拆除控制爆破[J]. 现代矿业, 2015(10): 49-51.  
LONG Chang-jun, NONG Qing-feng, LIANG Jian-ming. Demolition blasting of the smelting furnaces with the concretion for silicon and manganese[J]. *Modern Mining*, 2015(10): 49-51.
- [6] 曹春杰. 露天煤矿采空区上方作业安全厚度的确定及爆破设计[J]. 煤炭工程, 2013, 45(9): 25-27.  
CAO Chun-jie. Determination of security coping thickness and blasting design over goafs in surface mine[J]. *Coal Engineering*, 2013, 45(9): 25-27.
- [7] 束学来,郑炳旭,郭子如,等. 耐热炸药机理分析与优化浅析[J]. 工程爆破, 2014, 20(5): 59-63.  
SU Xue-lai, ZHEN Bing-xue, GUO Zi-ru. Mechanism and optimization analysis of heat-resistant explosives [J]. *Engineering Blasting*, 2014, 20(5): 59-63.
- [8] 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,中国: CN,CN101556130 A[P]. 2009.
- [9] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives [J]. *Physics of Fluids (1958-1988)*, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [10] 奥尔连科. ЛЛ. 爆炸物理学[M]. 孙承伟,译. 北京: 科学出版社, 2011: 1038-1039
- [11] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives[C]//Presented at the 8th Intern. Symp. on Detonation, Albuquerque, N. Mex., 15 Jul. 1985.
- [12] White B W, Sullivan K T, Gash A E, et al. Modeling the Detonation Wave Dynamics in Reactive Materials[R]. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA, 2016.
- [13] 李茂生,陈栋泉. 高温高压下材料的本构模型[J]. 高压物理学报, 2001, 15(1): 23-31.  
LI Mao-sheng, CHEN Dong-quan. A constitutive model for materials under high-temperature and pressure[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(1): 23-31.
- [14] 马宏昊,沈兆武,陈文川,等. PETN 和 RDX 在无起爆药雷管中作为激发药的对比性研究[J]. 含能材料, 2008, 16(3): 285-289.  
MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, CHEN Wen-chuan, et al. Research on the performance of PETN and RDX as the excitation powder [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(3): 285-289.
- [15] 张宝坪,等. 爆炸物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001: 291-296.
- [16] 马宏昊. 高安全雷管机理与应用的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.  
MA Hong-hao. Research on the principle and application of the high-safed etonator[D]. Hefei: University of science and technology of China, 2008.

## Numerical Simulation and Design of Explosive Diode

CUI Yu<sup>1,2</sup>, MA Hong-hao<sup>1,2</sup>, SHEN Zhao-wu<sup>1,2</sup>, REN Li-jie<sup>1,2</sup>, YANG Ming<sup>1,2</sup>, YU Yong<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** Aiming at the problem about early blasting of the detonating network in industry, a type of irreversible detonation explosive diode was designed and developed by numerical simulation method. Using the combination of ignition and growth model and ANSYS/LS-DYNA finite element software, transmitting positive detonation was simulated by various mass of the firing charge and the stopping backward detonation was simulated by various length of the delay element. Then the feasibility was validated by the positive and negative symmetry experiment and the velocity measurement of flying plane. Results show that the explosive diode can achieve the aims of successful transmitting positive detonation signal and stopping backward detonation signal and that the mass of firing charge and the length of linear delay elements must be limited. The least mass of firing charge is 30 mg and the minimum length of delay elements is 4 mm at 30 mg firing charge.

**Key words:** explosive diode; shock initiation; stopping detonation; firing charge; delay elements

**CLC number:** TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.04.001



**编者按:**本刊于2017年第2期刊登《关于六硝基芪(HNS)中“芪”的读音》后,引起含能材料领域学者们的热烈讨论,各类信函纷至沓来。在此,编辑部选取中国工程物理研究院化工材料研究所刘晓波副研究员来信,供讨论。

### 再论“芪”的发音

#### ——回《关于六硝基芪(HNS)中“芪”的读音》

在化学领域,“芪”是一个偶尔会见到的字,有一类有机化合物就叫“芪类化合物”。这是以白藜芦醇或其它二苯乙烯(如异丹大黄素、白皮衫醇等)为单体聚合而成的一类具有二苯乙烯骨架的化合物的总称。迄今为止,人们已经从许多植物(如小叶买麻藤、藜芦、虎杖何首乌、桑葚、葡萄)中分离得到约300余种芪类化合物。不过,关于“芪”这个字的读音,一直都有不同的说法,一说为zhǐ,一说为dǐ,有时候还会在一些网页和书刊中看到用“芪”代替“芪”的情形。

事实上,在人们常用的词典(如《新华大字典》、《现代汉语词典》、《新华汉语词典》、《词源》)中,也都没有“芪”这个字,这也许是其发音一直没有统一的原因吧。

我国对于有机化合物的命名始于19世纪末期,当时主要是通过音译、意译和造字来对国外命名的有机化合物进行汉化命名。“芪”这个字很有可能就是这个时期使用到化合物名称中的。笔者在康熙字典中查到“芪”字的注释。

芪,《唐韵》同“芪”,与“芪”别,详芪字注。

这里明确了芪与芪相同,也明确了芪与芪不同。笔者又在康熙字典中找到“芪”字的注释。

芪,《集韵》典礼切,音邸(dǐ),《尔雅·释草》芪萑(沙参属多年生草本植物,笔者注),根、茎似人参而叶小异,根味甜。又《集韵》軫视切,音旨(zhǐ),芪蒻,小葶(嫩的蒲草,笔者注)也。

从这里看到,“芪”字是有两个发音的。发音为dǐ时,表示一类植物;发音为zhǐ时表示嫩的蒲草。

根据前人对于国外命名的有机化合物的汉化命名,从意译的角度出发,芪类化合物是从植物中发现的一类化合物(a class of molecules found in plants)。因此,笔者认为这个字的发音应该为dǐ,如果发音为zhǐ,则仅仅归属到蒲草这一种植物了。从音译的角度看,芪类化合物(stilbene、stilbenoid)都有类似于dǐ的音节(til),这也强化了笔者对这个字发音为dǐ的看法。

中国工程物理研究院化工材料研究所 刘晓波