

文章编号: 1006-9941(2016)10-1005-06

# 一种间隙弱化爆炸零门的仿真与试验

李燕华, 李元, 李晓刚, 熊诗辉, 温玉全

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了提高爆炸零门的作用可靠性, 利用 ANSYS/LS-DYNA 程序对装药尺寸为  $0.8\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ , 不同间隙厚度的传统间隙零门和间隙弱化零门进行了数值模拟和理论分析, 并通过试验对仿真结果进行了验证。仿真和试验结果表明, 在传统间隙零门的基础上, 增加间隙厚度, 并增设圆形空气隙来弱化零门间隙强度, 有助于冲击波的衰减和零门间隙的打开, 零门间隙厚度的可靠性窗口从  $0.6 \sim 0.7\text{ mm}$  提高为  $0.7 \sim 1.0\text{ mm}$ , 明显提高了爆炸零门的作用可靠性。

**关键词:** 爆炸逻辑网络; 爆炸零门; 可靠性; 数值模拟**中图分类号:** TJ55; O389**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.10.015

## 1 引言

爆炸逻辑网络是由零门和其他爆炸线路组成的具有逻辑判断和运算功能的爆炸网络, 它采用类似数字电路的方法实现了爆炸的逻辑功能, 其特点有: 第一, 自选择性, 用内部逻辑的判断实现输出方式的选择; 第二, 少输入多输出性, 可以减少保险机构的数量; 第三, 抗干扰性, 炸药通道不受外界电磁环境的影响。爆炸逻辑网络在引信保险与解保机构、火箭发动机的安全程控点火以及定向战斗部的定向起爆控制等方面有广阔的应用前景。

爆炸零门是指能够切断或破坏爆轰通道装药, 从而关闭爆轰传播通道的爆炸逻辑网络元件。通常为 T 字型结构, 主要包括间隙零门、接触零门、拐角效应零门三种类型<sup>[1]</sup>。它是组成爆炸逻辑网络的基础元件, 其作用的可靠性直接影响爆炸网络的可靠性。

为了提高爆炸零门的作用可靠性, 很多学者对此开展了研究, 取得了一定效果<sup>[2-8]</sup>。但随着网络小型化的发展趋势, 网络装药尺寸的大幅减小, 接近其极限尺寸, 传统爆炸零门的可靠性大幅降低, 难以满足要求。主要存在以下问题: 拐角效应零门, 可靠性差, 无

明显可靠性窗口; 接触零门可靠性较高, 但零门的关闭时间较长, 不利于网络的小型化设计; 传统间隙零门可靠性较高, 但可靠性窗口窄, 不利于加工及装药<sup>[6]</sup>。为此, 温玉全等<sup>[6]</sup>对传统间隙零门做了改进设计, 在零门交叉处前方设计一个泄爆方槽, 避免了冲击波对装药的压实作用能使通道装药被快速破坏, 在一定程度上提高了间隙零门作用可靠性, 但依然存在间隙厚度可靠性窗口窄的问题。如果能通过一定方式弱化零门间隙的结构强度, 使得较小的冲击波压力也能快速打开间隙, 阻断信息通道爆轰波传播, 则能进一步提高间隙厚度的可靠性窗口。基于这一思想, 文献<sup>[8]</sup>提出在传统间隙零门的间隙处增设圆孔空气隙, 获得了一种新型的间隙弱化零门, 实验表明此类爆炸零门的间隙厚度的可靠性窗口得到了提高, 但未对其机理进行分析。

为了探究此种间隙弱化零门的作用机理, 得到其间隙厚度的可靠性窗口, 本研究借助 ANSYS/LS-DYNA 软件对其进行了三维数值模拟。利用冲击起爆理论和点火与成长爆轰模型, 对比分析传统间隙零门和弱化间隙零门中的冲击波压力衰减规律, 并对仿真模拟结果进行了实验验证。本研究在有效降低试验成本的同时能够为爆炸零门间隙结构的改进设计提供依据。

## 2 数值模拟研究

### 2.1 物理模型

两种间隙零门的物理结构如图 1 所示。传统间隙零门是一个四特征参数零门, 特征参量为沟槽尺寸  $d$ 、

收稿日期: 2016-03-02; 修回日期: 2016-04-21

基金项目: 武器装备预先研究项目(40XX4010X)

作者简介: 李燕华(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事火工系统理论与技术研究。e-mail: 3120130105@bit.edu.cn

通信联系人: 温玉全(1965-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事火工系统理论与技术研究。e-mail: wyquan@bit.edu.cn

间隙厚度  $H$ 、方槽与装药沟槽间距  $l$ 、方槽尺寸  $m \times n \times d$ 。新型的间隙弱化零门除具有传统间隙零门的特征参量外,圆孔空气隙尺寸  $\phi$  也是重要的特征参量。本研究主要是对间隙厚度  $H$  的可靠性窗口进行分析,故固定其它特征参量,装沟槽尺寸均为  $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ ,方槽与装药沟槽间距为  $0.1 \text{ mm}$ ,泄爆方槽的长宽深分别为  $4 \text{ mm}$ 、 $2 \text{ mm}$  和  $0.8 \text{ mm}$ ,圆孔空气隙尺寸为  $\Phi 0.6 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 。约束材料为 LY-12 硬铝,沟槽装药均为以 HMX 为基的某型标准传爆药,装药密度为  $1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

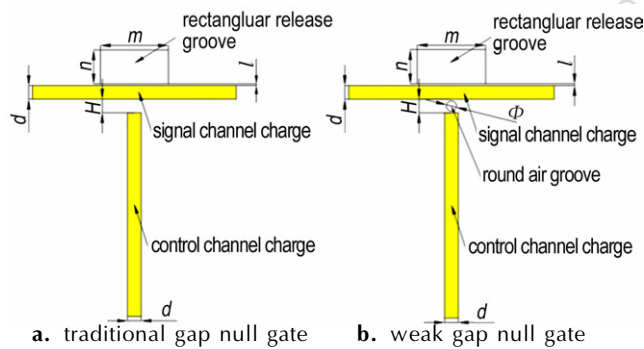


图1 传统间隙零门和间隙弱化零门的物理模型

Fig.1 Physical models of traditional and weak gap null gate

### 2.2 计算模型

采用 ANSYS/LS-DYNA 的多物质流固耦合算法进行计算,沟槽装药采用 Euler 网格,盖板和基板采用 Lagrange 网格。空气设置无反射边界,并采用体积粘度和沙漏控制。在控制通道初始端设置起爆点来实现爆轰波的输入,数值模拟过程采用 cm-g-us 单位制。按图 1 所述物理模型建立数值计算模型,两种间隙零门的计算模型如图 2 所示。

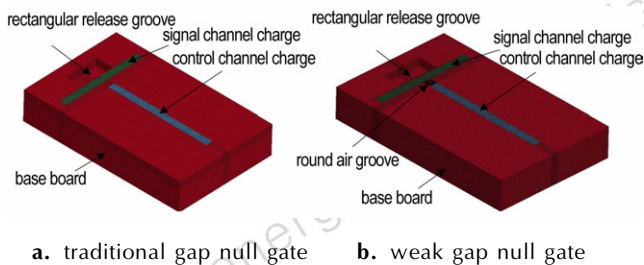


图2 传统间隙零门和间隙弱化零门的数值模型

Fig.2 Numerical models of traditional and weak clearance null gate

### 2.3 材料模型及状态方程

约束材料 LY-12 铝合金为应变率无关材料,选用塑性随动硬化材料模型,失效应变取  $0.77^{[9]}$ 。控制通

道装药采用高能炸药燃烧材料模型和 JWL 状态方程<sup>[10]</sup>,参数选取参见文献[11]。信息通道的炸药采用点火增长模型,除利用 JWL 状态方程来描述未反应炸药和反应产物的状态外,还引入了一个描述炸药受冲击反应的反应速率方程<sup>[12]</sup>:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = I(1-F)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-F)^c F^d P^y + G_2(1-F)^e F^g P^z$$

$$0 < F < F_{igmax} \quad 0 < F < F_{G1max} \quad F_{G2min} < F < 1 \quad (1)$$

式中,  $F$  是炸药的反应质量分数 ( $F=0$  表示没有反应,  $F=1$  表示反应完成),  $t$  为反应时间,  $\mu\text{s}$ ;  $P$  为压力,  $\text{GPa}$ ;  $I, G_1, G_2, a, b, c, d, e, g, x, y, z, F_{igmax}, F_{G1max}, F_{G2min}$  为常数。参数  $a$  是阻止点火的临界压缩度,  $I, x$  是控制起爆的参量,  $G_1, d$  控制点火后反应的早期增长,  $G_2, z$  确定高压反应速率。本研究所用网络装药组分与 LX-10 接近,故参数选取参考文献[12],具体参数如表 1 所示。

表1 网络装药的点火增长模型参数 ( $=1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

Table 1 Ignition and Growth model parameter of network charge ( $=1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

unreacted JWL EOS	product JWL EOS	reaction rate parameters
$A=952200 \text{ GPa}$	$A=722.4 \text{ GPa}$	$I=7.43 \times 10^{11} \mu\text{s}^{-1}$
$B=-5.944 \text{ GPa}$	$B=9.02 \text{ GPa}$	$a=0.667$
$R_1=14.1$	$R_1=4.6$	$b=0$
$R_2=1.41$	$R_2=1.3$	$x=20$
$w=0.8867$	$w=0.38$	$F_{igmax}=0.3$
$C_v=2.7813 \times 10^{-3} \text{ GPa/K}$	$C_v=1 \times 10^{-3} \text{ GPa/K}$	$G_1=120 \text{ GPa}^{-2} \cdot \mu\text{s}^{-1}$
$T_0=298 \text{ K}$	$E_0=10.2 \text{ GPa}$	$c=0.667$
shear modulus=5.0 GPa		$d=0.333$
yield strength=0.2 GPa		$y=2$
		$F_{G1max}=0.5$
		$G_2=400 \text{ GPa}^{-2} \cdot \mu\text{s}^{-1}$
		$e=0.333$
		$z=2$
		$g=1$
		$F_{G2min}=0.5$

### 2.4 数值模拟结果分析

#### 2.4.1 传统间隙零门模拟结果

传统间隙零门的间隙厚度为  $0.6 \text{ mm}$  时,爆轰波传播路径上单元的压力曲线如图 3 所示。从图 3 中看出,控制通道装药形成稳定爆轰波的压力约为  $18.8 \text{ GPa}$ ,在  $t=1.44 \mu\text{s}$  时,冲击波传播到零门间隙,受到间隙零门金属铝阻挡开始衰减,单元 E、F、G、H、I、J 的压力值依次为  $16.9, 14.4, 12.7, 11.1, 9.17, 6.04 \text{ GPa}$ 。从图 3 可以看出,金属铝对冲击波的衰减作用明显,经过  $0.6 \text{ mm}$  间隙后,冲击波的压力降为

6.04 GPa, 低于网络用药的起爆阈值 6.45 GPa, 不能起爆信息通道装药。传统间隙零门的作用过程见图 4, 爆轰波在 1.46  $\mu\text{s}$  时开始进入零门间隙, 3.5  $\mu\text{s}$  左右时, 爆轰波已经通过间隙并且完全打断间隙, 零门功能实现。

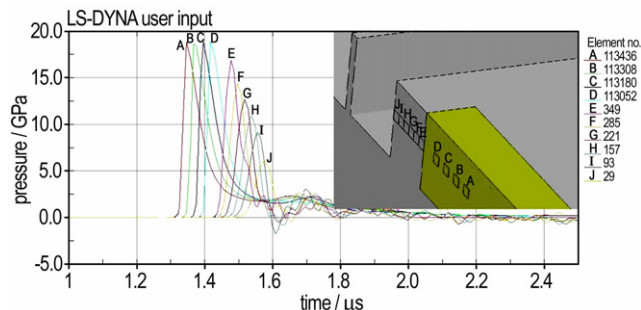


图 3 传统间隙零门爆轰波传播路径上单元的压力曲线  
Fig. 3 Pressure curves of several elements in detonation wave propagation path of traditional gap explosive null gate

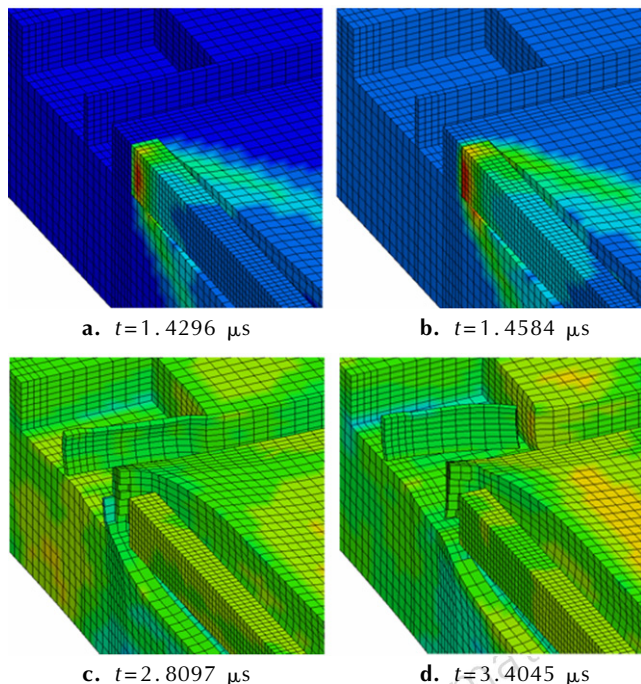


图 4 传统间隙零门作用过程  
Fig. 4 Action process of traditional gap explosive null gate

当间隙厚度为 0.5 mm 时, 通过零门后的冲击波的压力为 8.06 GPa, 大于网络用药的起爆阈值, 信息通道装药被起爆, 见图 5。当厚度达到 0.8 mm 时, 冲击波压力低于 4.70 GPa, 不会引爆信息通道装药, 但间隙强度太大, 间隙没有打开, 不能阻断信息通道爆轰波传播。由此得出本间隙零门以间隙厚度表征的可靠性窗口为: 0.6 ~ 0.7 mm。

从以上模拟可以看出, 减小间隙厚度, 到达信息通

道装药的冲击波压力过大, 易引爆装药; 增加间隙厚度, 冲击波压力减低, 但间隙强度过大无法切断零门。因此, 传统间隙零门的可靠性窗口很窄, 需要对其进行优化设计。

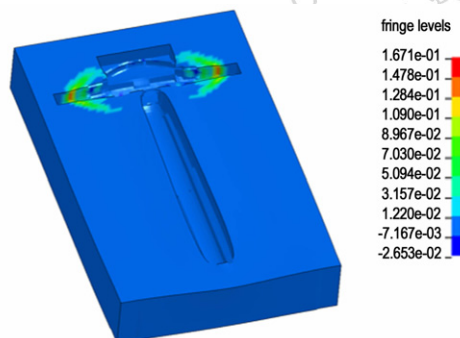


图 5 间隙厚度为 0.5 mm 的作用效果

Fig. 5 Performance for traditional gap explosive null gate in 0.5 mm gap

### 2.4.2 间隙弱化零门模拟结果

以传统间隙零门为基础, 适当增加间隙厚度, 并在间隙中心处设计一个  $\Phi 0.6 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$  的圆形孔, 在降低冲击波压力的同时弱化间隙强度, 获得了间隙弱化的新型零门。以间隙总厚度 0.8 mm 为例, 当爆轰波稳定传播至零门, 首先通过铝介质, 然后通过空气隙, 最终通过铝介质衰减到达信息通道装药。在此过程中, 铝惰性介质被推冲变形破坏, 切断被发装药, 实现零门的关闭功能。此冲击过程如图 6 所示。

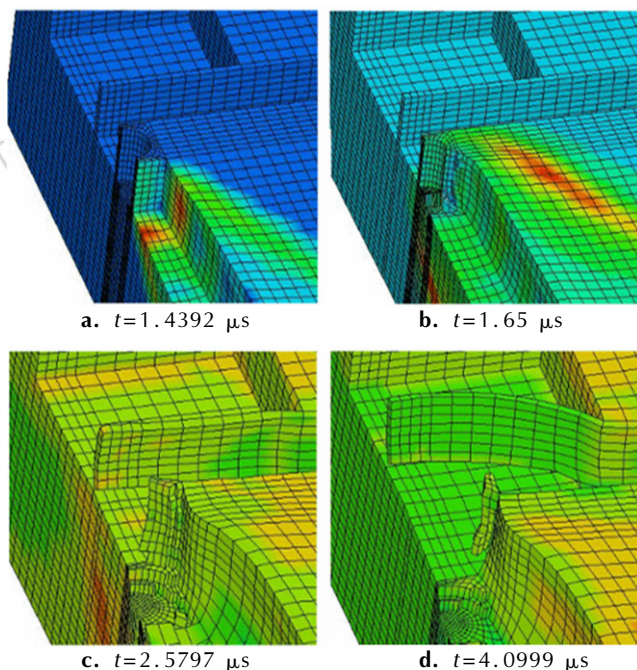


图 6 间隙弱化零门作用过程

Fig. 6 Action process of improved weak gap explosive null gate

爆轰波传播路径上单元的压力变化曲线如图7所示。从图7可以看出,爆轰波到达零门前已稳定在18.8 GPa左右,达到零门并进入惰性介质后冲击波压力迅速下降,零门间隙处前后两个单元E、F的压力值分别为17.2 GPa和3.45 GPa。由此可见,传递至信息通道装药的冲击波压力已远低于其起爆阈值,信息通道装药不会被起爆,安全地实现零门关闭功能。

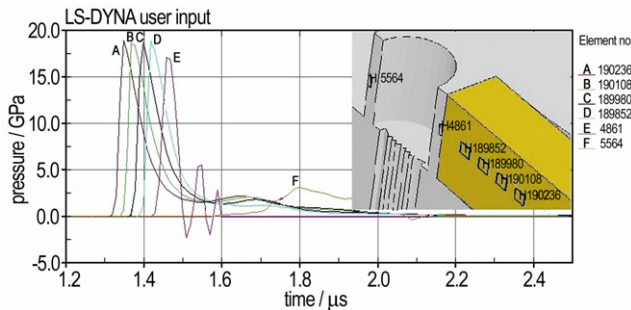


图7 间隙弱化零门爆轰波传播路径上单元的压力曲线

Fig.7 Pressure curves of several elements in detonation wave propagation path of weak gap explosive null gate

### 2.4.3 仿真结果统计及分析

通过一系列仿真,得到传统间隙零门和间隙弱零门的仿真结果,分别见表2和表3。

表2 传统间隙零门的仿真结果

Table 2 Simulation results of the traditional gap null gate

$H/mm$	$p/GPa$	cut off	detonation of signal charge
0.4	8.06	Yes	Yes
0.5	7.03	Yes	Yes
0.6	6.04	Yes	No
0.7	5.32	Yes	No
0.8	4.70	No	No
0.9	4.11	No	No
1.0	3.65	No	No

Note:  $H$  is gap thickness;  $p$  is shock wave pressure through gap.

表3 间隙弱化零门的仿真结果

Table 3 Simulation results of the weak gap null gate

$H/mm$	$p/GPa$	cut off	detonation of signal charge
0.7	4.58	Yes	No
0.8	3.45	Yes	No
0.9	2.46	Yes	No
1.0	1.98	Yes	No
1.1	1.41	No	No

Note:  $H$  is gap thickness;  $p$  is shock wave pressure through gap.

从表2和3可以看出,通过两种零门后的冲击波压力都随着间隙厚度的增加而降低。但当间隙总厚度相同时,冲击波通过间隙弱化零门后的压力的小于传统间隙零门后的压力。这说明增设圆孔空气隙能有效加速冲击波的衰减,防止信息通道装药被起爆;同时还能使零门结构强度减弱、易于变形,利于零门实现关闭功能。零门间隙厚度窗口由原来的0.6~0.7 mm提高为0.7~1.0 mm。

## 3 试验研究

为了验证仿真结果,考核零门的作用效果,以传统间隙零门和间隙弱化零门为基本元件,组合设计加工了异步与门,相关材料与尺寸与仿真模型相同,如图8所示。在异步与门中, $I_1$ 、 $I_2$ 为两个独立的输入端, $S$ 为三通, $N_1$ 、 $N_2$ 为间隙零门, $O$ 为输出端。若考核 $N_1$ 零门的作用效果,则单独从 $I_1$ 端输入爆轰波,爆轰波首先沿直线 $SN_2N_1$ 传播到 $N_1$ ,切断零门 $N_1$ 处的装药,此时爆轰波经 $SMN_1$ 拐弯传播到 $N_1$ 时中止, $O$ 端无输出。同理,若考核 $N_2$ 零门作用效果,则 $I_2$ 端先输入爆轰波,一定时间后 $I_1$ 端输入的爆轰波才到 $N_2$ 处,此时零门 $N_2$ 已经打开, $SN_2N_1$ 间的装药被破坏,爆轰波只能沿三通 $S$ 拐弯传播, $O$ 端有输出。

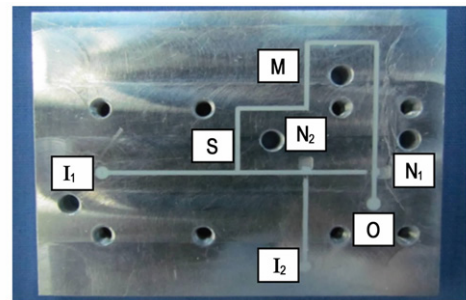


图8 异步与门的装药效果图

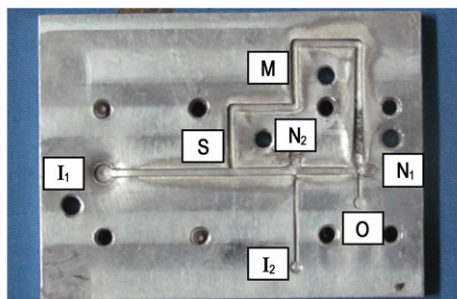
Fig.8 Charge photo of asynchronous AND gate

用36#电雷管分别以单输入和双输入模式起爆异步与门,爆轰试验效果如图9所示,从图9可以看出,当单独 $I_1$ 点起爆时,零门 $N_1$ 关闭,输出端 $O$ 没有爆轰波输出;当雷管先从 $I_2$ 起爆,关闭零门 $N_2$ ,然后从 $I_1$ 起爆,爆轰波绕行 $SMN_1$ 经 $N_1$ 输出爆轰波。

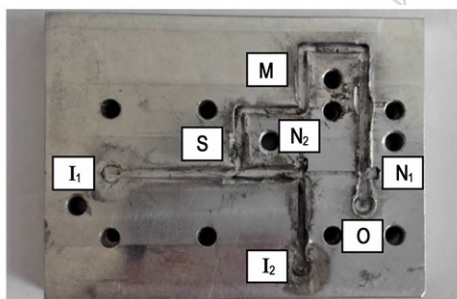
根据不同的输入模式,观察沟槽装药爆轰传播及输出端的输出情况,考核间隙零门是否成功作用。两种间隙零门的试验结果统计见表4和表5。

从表4可以看出,传统间隙零门的间隙厚度在

0.6 mm以下时,信息通道装药易被冲击起爆,成功率较低;间隙厚度在0.6~0.7 mm时,所有零门成功作用;间隙厚度在0.8 mm以上时,零门难以切开,零门的成功率较低。



a. Single-input



b. Double-input

图9 异步与门的测试效果图

Fig.9 Experimental effect photo of asynchronous AND gate

表4 传统间隙零门试验结果

Table 4 Experimental results of the traditional gap null gate

gap thickness H/mm	total number	succeeded	failed	success rate/%
0.4	30	0	30	0
0.5	30	6	24	20
0.6	30	30	0	100
0.7	30	30	0	100
0.8	30	8	22	26.7
0.9	30	2	28	6.7

表5 间隙弱化零门试验结果

Table 5 Experimental results of the weak gap null gate

gap thickness H/mm	total number	succeeded	failed	success rate/%
0.7	30	30	0	100
0.8	30	30	0	100
0.9	30	30	0	100
1.0	30	30	0	100
1.1	30	24	6	80
1.2	30	18	12	60

从表5可以看出,间隙弱化零门的间隙厚度在

0.7~1.0 mm时,所有零门成功作用;间隙厚度在1.1 mm以上时,成功率降低,但依然高于50%。由此可以看出,增设圆孔空气隙既能弱化间隙强度也能避免起爆信息通道装药,明显提高了间隙零门的可靠性。

## 4 结论

(1) 仿真结果表明,通过增设圆形空气隙弱化了零门间隙,既能使得间隙惰性介质更易变形破坏,也能有效加速冲击波的衰减,防止信息通道装药的误爆,有利于零门实现关闭功能;在装药尺寸为0.8 mm×0.8 mm条件下,零门间隙厚度窗口从0.6~0.7 mm提高为0.7~1.0 mm。

(2) 试验结果表明,在传统间隙零门上增设圆形空气隙有利于零门功能的实现,此结构可以作为基础元件用以组网。

### 参考文献:

- [1] 温玉全. 刚性爆炸网络若干应用研究[D]. 北京:北京理工大学博士学位论文,2000.  
WEN Yu-quan. Study on several applications of explosive logic circuit[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2000.
- [2] Courser D L. Explosive means: USA, 3095812 [P]. 1963.
- [3] Meyers W H. On The design of explosive logic element [R]. LA-UR-84-392; 1984.
- [4] 罗华平, 黄亨建, 吴奎先, 等. 一种新型爆炸零门设计研究[J]. 含能材料, 2005, 13(增刊): 36-38.  
LUO Hua-ping, HUANG Heng-jian, WU Kui-xian, et al. Study on a new explosive logic null gate[J]. Chinese Journal of Energetic Materials( Hanneng Cailiao), 2005, 13(supplement): 36-38.
- [5] 李翔宇, 范国庆, 王马法, 等. 一种基于拐角效应的新型爆炸零门试验研究[C]//第六届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 2010: 162-165.  
LI Xiang-yu, FANG Guo-qing, WANG Ma-fa, et al. Experimental study on a new explosive null gate base on corner effect[C]//The ninth national academic symposium on experimental technology of explosive mechanics. 2010: 162-165.
- [6] 温玉全, 卢斌, 焦清介. 改进间隙式爆炸零门的设计及可靠性研究[J]. 火工品, 2001(4): 410-413.  
WEN Yu-quan, LU Bin, JIAO Qing-jie. The design of improving gap null gate and its reliability study[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2001(4): 410-413
- [7] 龚柏林, 卢芳云, 李翔宇, 等. 爆炸逻辑间隙零门实验研究[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(3): 25-28.  
GONG Bai-lin, LU Fang-yun, LI Xiang-yu, et al. Experimental studies on the design of explosive logic gap null gate[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(3): 25-28.
- [8] 黄海龙. 六分位爆炸逻辑网络设计及可靠性分析[D]. 北京:北京理工大学硕士学位论文,2006.  
HUANG Hai-long. The design and reliability analysis of six partite explosive logic circuit[D]. Beijing: Beijing Institute of Tech-

- nology, 2006.
- [9] 米双山, 张锡恩, 陶贵明. 钨球侵彻 LY212 铝合金靶板的有限元分析[J]. 爆炸与冲击, 2009, 25(5): 477-480.  
MI Shuang-shan, ZHANG Xi-en, TAO Gui-ming. Finite element analysis of spherical fragments penetrating LY-12 aluminum alloy target[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 25(5): 477-480.
- [10] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosive[J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [11] Tarver C M, Hallquist J O. Modeling two-dimensional shock initiation and detonation wave phenomena in PBX9404 and LX-17 [C]// Seventh Symposium (International) on Detonation, Naval Surface Weapons Center, USA. 1981: 488-497.
- [12] Tarver C M, Urtiew P A, Chidester S K, et al. Shock compression and initiation of LX-10[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993(18): 117-127.

## Numerical Simulation and Experimental Study of Weak Gap Explosive Null Gate

LI Yan-hua, LI Yuan, LI Xiao-gang, XIONG Shi-hui, WEN Yu-quan

(State Key Laboratory of Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to improve the function reliability of explosive null gate, the traditional and weak gap explosive null gate whose charge size are 0.8 mm×0.8 mm with different gap thicknesses are simulated by ANSYS/LS-DYNA software, and the simulation results are verified through experiments. The simulation results and experimental results show that an additional round air groove on the basis of traditional gap explosive null gate could contribute to shock attenuation and gap breakage. Gap window of the null gate for reliable action is increased from 0.6-0.7 mm to 0.7-1.0 mm, which improve the function reliability of gap null gate.

**Key words:** explosive logic circuit; explosive null gate; reliability; numerical simulation

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.10.015