doi:10.11887/j.cn.201806027 http://journal.nudt.edu.cn

新型导爆索式爆炸零门设计及试验*

丁亮亮[1],李振铎[1,2],李翔宇[1],卢芳云[1]
(1. 国防科技大学 文理学院,湖南 长沙 410073;2. 中国人民解放军63611部队,新疆 库尔勒 841000)

摘 要:为了增强爆炸零门在应用中的稳定性,降低对沟槽装药装填工艺的要求,以间隙零门为研究对象,提出了以导爆索代替部分沟槽装药结构的方法。对具有不同尺寸参数的导爆索、沟槽装药以及零门间隙进行组合试验,以期通过试验得到装填工艺简单且控制通道对信号通道作用稳定的装填物质组合。研究结果表明,通过对由导爆索构成的爆炸零门进行合理的参数配置,能够实现在提升零门装置稳定性的同时又保证其可靠性。

关键词:爆炸力学;爆炸逻辑网络;间隙零门;导爆索
中图分类号:O381 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2018)06-189-06

Design and experiment of a new type explosive null gate with detonating cord

DING Liangliang[1], *LI Zhenduo*[1,2], *LI Xiangyu*[1], *LU Fangyun*[1]
(1. College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. The PLA Unit 63611, Korla 841000, China)

Abstract: In order to enhance the stability of the explosive null gate and reduce the requirements of the groove filling process in the applications, the method which used the detonating cord to replace the partial groove charge structure was proposed by taking the gap null gate as the research object. The combination experiments of detonating cord with different size parameters, groove charge and null gate gap were carried out, and the optimal filling material combination which has simple filling process and more stable control ability of the signal channel was expected to be obtained. Results indicate that the stability and reliability of the explosive null gate device can be guaranteed, and the parameters of the explosive null gate consisting of detonating cord be properly configured.

Key words: explosion mechanics; explosive logic network; gap null gate; detonating cord

爆炸逻辑网络(Explosive Logic Network, ELN)最早是由美国海军武器中心(Naval Weapons Center, NWC)和海军表面武器中心(Naval Surface Weapons Center, NSWC)率先开展研究,随后洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)、哈瑞戴蒙德实验室(Harry Diamond Laboratory, HDL)等机构也陆续加入了该研究行列。爆炸逻辑网络具有类似电路的信号处理功能,能够进行逻辑判断和逻辑运算,具有高安全性、高可靠性以及低成本的特性。由于其具有自选择性、抗干扰性以及少输入产生多输出的特点,它在引信安全控制系统、定向战斗部起爆系统等领域得到了广泛应用[1]。Silvia[2-3]首次提出了爆炸逻辑网络的概念并设计出具有逻辑功能的元件以及破坏性桥接通路和具有单向导通功能的爆炸二极管。Silvia和Ramay[4]于1970年发现了拐角效应,并将点接触式零门改为拐角零门。20世纪80年代末,Meyers[5]基于"与/非"门爆炸逻辑元件设计出"两输入三输出"的复合逻辑网络,并提出了可靠性/安全性概率窗口概念。1991年,Silvia制成了一种异步爆炸逻辑网络,由爆炸逻辑"与"门、"与/或"门连同复杂逻辑门组成。

国内关于爆炸逻辑网络的研究工作开始于20世纪70年代末,中国工程物理研究院首先针对核武器同步起爆问题进行了小尺寸传爆药的理论和试验研究[6]。20世纪80年代中期开始,国内多家单位开始对爆炸逻辑网络的原理及其应用进行研究,并取得了一系列成果。1990年,刘举鹏等[7]对爆轰波拐角绕射现象进行了机理性研究,并提出了爆炸逻辑零门的设计原则。1994

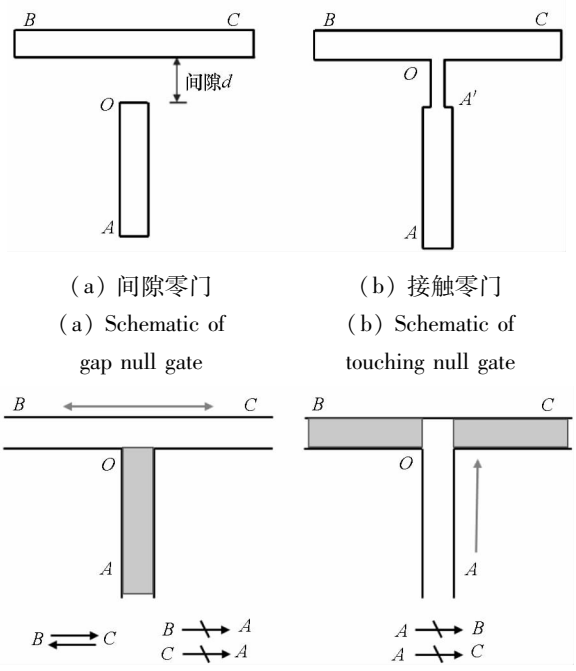
* **收稿日期**:2017-09-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11202237,11132012)
作者简介:丁亮亮(1993—),男,河南南阳人,博士研究生,E-mail:dingliangliang14@nudt.edu.cn;
李翔宇(通信作者),男,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:xiangyulee@nudt.edu.cn

年,王树山等[8]研究了爆炸逻辑零门的设计原理和设计方案,并成功研制出基板式爆炸逻辑“与”门。1997 年,焦清介等[9]建立了爆炸逻辑零门作用可靠性的数学模型。2009 年,龚柏林等[10]探索了一种新型药剂爆炸零门适用间隙范围,并设计出一种小尺寸间隙零门。

通过对国内外参考文献的调研可以发现:关于爆炸逻辑网络工作原理方面的研究较为成熟,但是在爆炸逻辑网络的应用和可靠性方面的研究还相对较少。为了方便爆炸逻辑网络在应用中的装配,提升装置运输以及储存的稳定性,本文基于间隙零门的基本结构,提出并验证了将导爆索引入零门的设计方案,为爆炸逻辑网络设计提供一定参考。

1 爆炸逻辑零门工作原理

爆炸逻辑零门是组成爆炸逻辑网络的基本逻辑原件,它通过切断或破坏爆轰通道来阻断信号在通道中沿通道装填物质的传播。多个爆炸零门可以组合成具有特定输入输出能力的复杂爆炸逻辑网络。当前的爆炸零门按照结构划分,主要有三种类型:间隙零门、接触零门、拐角零门,如图 1 所示。



(a) 间隙零门 (b) 接触零门

(a) Schematic of gap null gate (b) Schematic of touching null gate

(c) 拐角零门

(c) Schematic of corner effect null gate

图 1 爆炸逻辑零门原理图

Fig. 1 Schematic of explosive logic null gate

间隙零门工作原理是利用控制通道内爆轰波在间隙中产生冲击波来破坏信号通道的结构,进而切断信号传播。具体表现为当控制通道$\overline{AO}$有爆轰信号输入时,信号通道$\overline{BC}$内的爆轰信号会在 O 点被切断,如图 1(a)所示。

接触零门工作原理是通过减小纵向信号通道在交叉点处的通道宽度$\overline{A'O}$,使得纵向爆轰波传至交叉点附近时变弱,进而利用弱冲击波来破坏横向通道$\overline{BC}$中的装药,达到切断横向通道$\overline{BC}$中爆轰波的传播,如图 1(b)所示。

拐角零门基本工作原理是利用了爆轰波的拐角效应,即通过对信号通道进行设计,使得爆轰波只能沿直线传播而不能绕过直角传播。拐角零门的结构通常为“T”型,其爆轰波传播特点是爆轰波在 B 和 C 之间是可以互相传播的,但均不能绕过 O 点传至 A 点;纵向通道$\overline{AO}$中的爆轰波也不能绕过 O 点传至 B 点和 C 点,从而将横向爆轰通道$\overline{BC}$关闭,如图 1(c)所示。

本文的主要研究对象是间隙零门结构,考虑到传统间隙零门可靠性窗口太窄,不利于加工及装药,便采用改进型间隙零门,如图 2 所示。在控制通道和信号通道相交处设置一泄爆槽 E,以减小零门作用时间,增强控制通道对信号通道破坏效果,大大地拓宽了可靠性窗口。

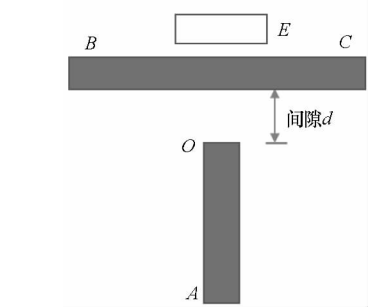


图 2 改进型间隙零门

Fig. 2 Schematic diagram of modified gap null gate

爆炸零门的可靠性受到沟槽药以及装药工艺的显著影响,并且在实际使用过程中,现场温度、湿度以及运输过程中的振动都可能改变沟槽装药的性质,这些问题都增加了可靠性窗口的不确定性。

为了解决上述问题,本文设计了几种新型零门,以不同尺寸的导爆索部分或者完全代替沟槽装药结构。通过试验研究,对比几种新型组合下控制通道对信号通道的作用效果,找出稳定的零门组合形式。

2 新型间隙零门结构设计

2.1 沟槽装填物质选择

在沟槽传爆过程中影响零门效果的因素较

多，主要包括传爆药的性能、配比、胶合剂类型、压装密度、基板材料等。龚柏林等[10]提出一种细化 RDX 与含能胶合剂配比为 95∶5 的传爆药，通过挤抹法对沟槽进行装填，能够满足传爆条件。考虑到降低装填工艺要求的同时增强传爆信号稳定性两个方面的因素，试验中考虑在沟槽内装填一致性较强、受外界环境影响小的传爆物质。本文中装填物质分为三个类型：ϕ1 mm 导爆索、ϕ1.5 mm 导爆索和 RDX 与含能胶合剂配比为 95∶5的传爆药。

2.2　零门结构设计

试验装置如图 3 所示。基板厚度为 10 mm，材料为硬铝，在每块试验板上设置 10 个零门，沟槽的宽和深度由装填物质的种类和尺寸决定。信号通道和控制通道的时间序列由通道长度控制，即爆轰波沿$\overline{ABCD}$传播的时间较沿$\overline{AD}$传播的时间长，且多余的时间大于控制通道在 D 处切断信号的时间。

试验设计的零门间隙最大值为 0.75 mm，文献[10]中小尺寸零门设计方案，即矩形零门的环形通道$\overline{ABCD}$边长 10 mm，通道长度差20 mm。考虑到导爆索末端的破坏能力有限，将泄爆槽与信号通道连通，并在信号通道装填导爆索的部分装置中，贯通控制通道与信号通道，以导爆索的外壳充当零门的间隙。本文共设计了 14 组不同的组合类型试验，对每种组合设置 4 个零门进行试验，试验安排如表 1 所示。

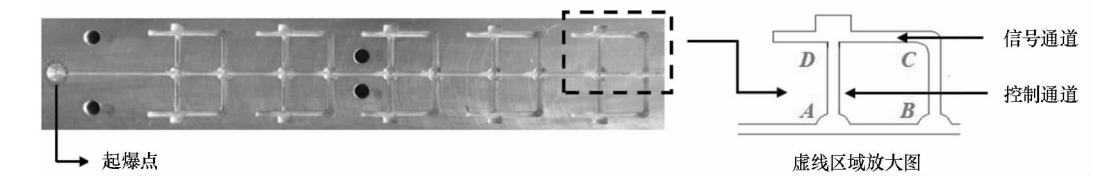


图 3　间隙零门试验装置

Fig. 3　Experimental setup of gap null gate

表 1　试验安排

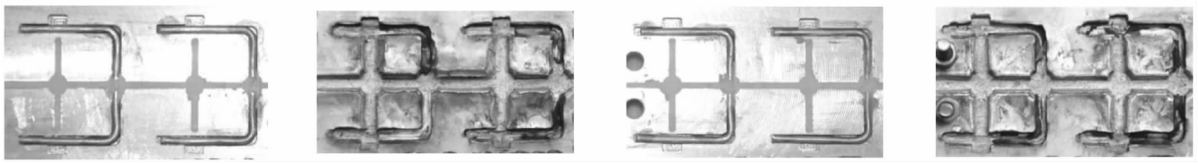
Tab. 1　Experimental arrangement

编号	沟槽装填物质		间隙宽度/mm
	控制通道(宽×深)	信号通道	
1	1.3 mm×1.3 mm 沟槽装药	ϕ1.5 mm 导爆索	0.75
2	1.3 mm×1.3 mm 沟槽装药	ϕ1.5 mm 导爆索	0.5
3	1.8 mm×1.7 mm 沟槽装药	ϕ1.5 mm 导爆索	0.3
4	1.3 mm×1.3 mm 沟槽装药	ϕ1.0 mm 导爆索	
5	ϕ1.0 mm 导爆索	1.3 mm×1.3 mm 沟槽装药	
6	ϕ1.5 mm 导爆索	1.3 mm×1.3 mm 沟槽装药	
7	ϕ1.5 mm 导爆索	ϕ1.5 mm 导爆索	0.3
8	ϕ1.5 mm 导爆索	ϕ1.5 mm 导爆索	
9	ϕ1.5 mm 导爆索	ϕ1.0 mm 导爆索	
10	1.75 mm×1.7 mm 沟槽装药	ϕ1.5 mm 导爆索	
11	1.65 mm×1.7 mm 沟槽装药	ϕ1.5 mm 导爆索	
12	1.6 mm×1.7 mm 沟槽装药	ϕ1.5 mm 导爆索	
13	1.5 mm×1.7 mm 沟槽装药	ϕ1.5 mm 导爆索	
14	1.4 mm×1.7 mm 沟槽装药	ϕ1.5 mm 导爆索	

3　间隙零门试验及结果分析

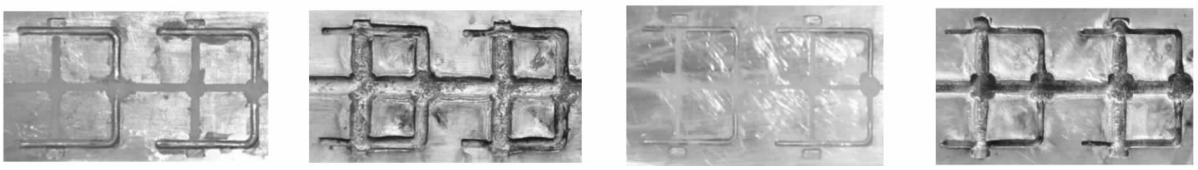
3.1　间隙零门试验结果

基于表 1 的试验安排可知，沟槽的装填物质主要分为两个部分，即沟槽装药(细化 RDX 与含能胶合剂配比为 95∶5 的传爆药)和导爆索。沟槽的装填物质不同，对应的装填工艺也不同。沟槽装填物质为传爆药时，采用挤抹法对沟槽传爆药进行装填；沟槽装填物质为导爆索时，装填工艺则是利用胶水将长度适当的导爆索固定于沟槽通道内。零门基板上端覆盖 2 mm 厚铝制盖板并用螺钉固定，用 8 号军用电雷管对装置进行起爆。试验前后基板情况对比及零门实现情况如图 4 所示。在试验结果中，如果信号通道的末端尺寸宽度没有变化，意味着没有爆轰波经过，则说明零门成功；如果信号通道的末端尺寸宽度变大，意味着有爆轰波经过，则说明零门失败。



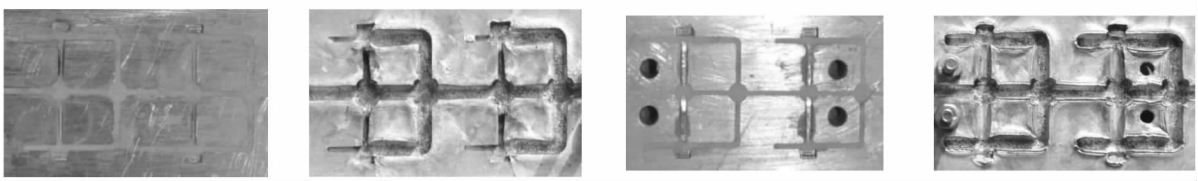
（a）1#试验（0 个零门实现）
（a）1# test（0 null-gate succeed）

（b）2#试验（0 个零门实现）
（b）2# test（0 null-gate succeed）



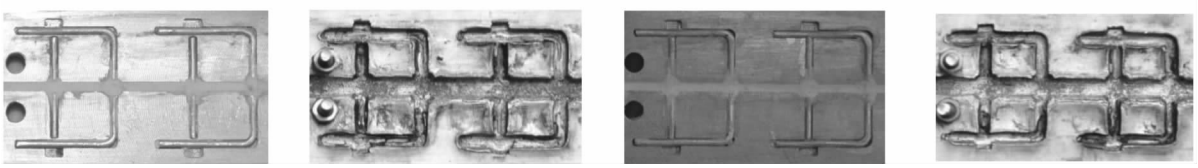
（c）3#试验(4 个零门实现）
（c）3# test（4 null-gates succeed）

（d）4#试验(2 个零门实现）
（d）4# test（2 null-gates succeed）



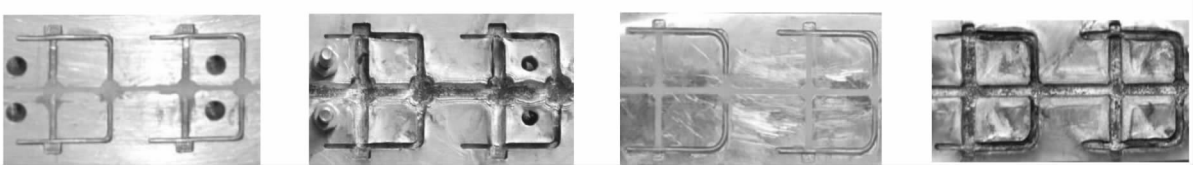
（e）5#试验(4 个零门实现）
（e）5# test（4 null-gates succeed）

（f）6#试验(0 个零门实现）
（f）6# test（0 null-gate succeed）



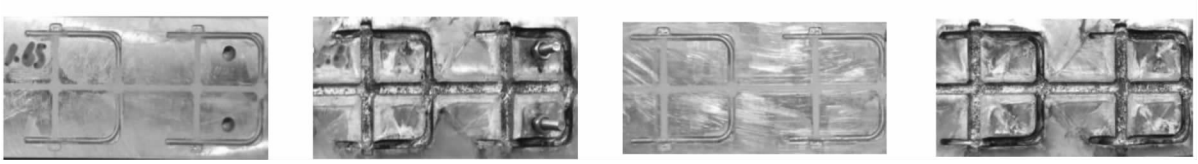
（g）7#试验(0 个零门实现）
（g）7# test（0 null-gate succeed）

（h）8#试验(0 个零门实现）
（h）8# test（0 null-gate succeed）



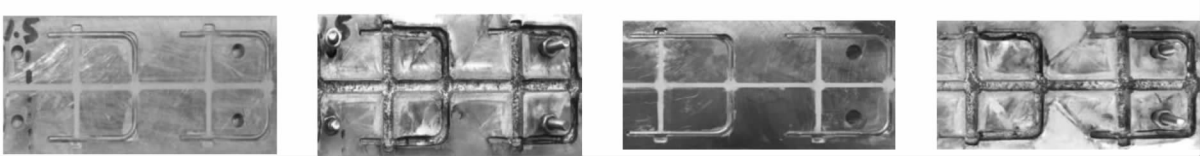
（i）9#试验(4 个零门实现）
（i）9# test（4 null-gates succeed）

（j）10#试验(2 个零门实现）
（j）10# test（2 null-gates succeed）



（k）11#试验(3 个零门实现）
（k）11# test（3 null-gates succeed）

（l）12#试验(2 个零门实现）
（l）12# test（2 null-gates succeed）



（m）13#试验(4 个零门实现）
（m）13# test（4 null-gates succeed）

（n）14#试验(3 个零门实现）
（n）14# test（3 null-gates succeed）

图 4　试验前后基板对比

Fig. 4　Comparison of results before and after experiments

为了更直观地展示控制通道对信号通道的截断作用,以 8#和 9#试验结果为例,分别介绍零门成功与失败的试验结果,如图 5、图 6 所示。由图5可知,虚线框内的 4 个区域对应的信号通道都变宽了,意味着 4 个零门都失败。

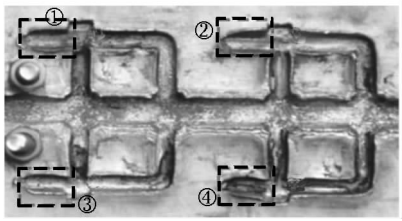


图 5　8#试验结果分析示意图

Fig. 5　Analysis schematic diagram of 8# experimental result

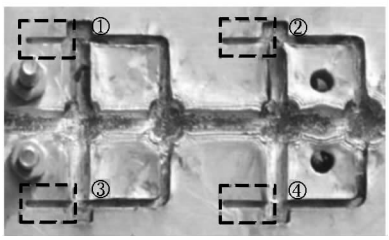


图 6　9#试验结果分析示意图

Fig. 6　Analysis schematic of 9# experimental result

由图 6 可知,虚线框内的 4 个区域对应的信号通道都没有发生变化,意味着 4 个零门都成功。

根据图 4 所示试验结果以及各组试验的成功比例,可以得到如下结论:

1)对比试验 1# ~ 3#的结果可得到:零门间隙过大时,难以破坏信号通道中装填的 ϕ1.5 mm 导爆索。由于在控制通道爆轰产物作功能力相同的条件下,间隙越小,其表现出的抵抗能力就越小,则控制通道越容易截断信号通道。

2)对比试验 4# ~ 5#的结果可得到:ϕ1.0 mm 导爆索可破坏 1.3 mm × 1.3 mm 沟槽装药,而 1.3 mm × 1.3 mm 沟槽装药对 ϕ1.0 mm 导爆索的破坏效果不稳定。对于导爆索而言,由于其由外壳包覆,使得爆轰波能够稳定传播,因而用于控制通道时,能稳定截断信号通道。然而,沟槽装药的爆轰波在传播时容易受稀疏波影响,便会导致对信号通道的破坏也不稳定。

3)对比试验 6# ~ 9#的结果可得到:当控制通道内为 ϕ1.5 mm 导爆索时,直接接触 ϕ1.0 mm 导爆索可成功破坏信号通道,但对沟槽装药和同尺寸导爆索作用效果不明显。对于导爆索而言,直接与沟槽装药接触必然会引爆沟槽装药而失去截断信号通道的能力;若直接与导爆索接触,则由于其末端对信号通道的破坏能力极其有限,只能截断直径较小的导爆索对应的信号通道,对于直径较大的导爆索则不能截断。

4)对比试验 10# ~ 14#的结果可得到:控制通道填充 1.5 mm × 1.7 mm 沟槽装药可以稳定破坏信号通道内的 ϕ1.5 mm 导爆索。控制通道内的沟槽装药尺寸越大,其做功能力越大。控制通道中爆轰波对信号通道作用时会存在两种情况:一是直接将信号通道截断而不引爆信号通道内的装药(对应零门成功);二是将信号通道截断的同时,还引爆了信号通道内的装药(对应零门失败)。因此,会存在一个最佳的装药尺寸,使得 4 个零门在截断信号通道的同时,又不引爆信号通道内的装药,本文经过试验得到的最佳装药尺寸是1.5 mm × 1.7 mm 的沟槽装药。

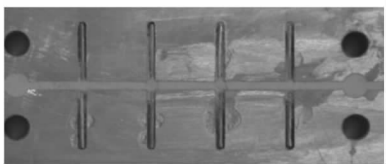
3.2　信号通道对控制通道的作用研究

爆炸逻辑网络具有少输入多输出的特点,对于没有信号输入的控制通道,当信号通道的爆轰波传至通道交汇处时,可能会产生爆轰波由控制通道进入并传至输入点,这将给某些特定的爆炸逻辑网络带来不必要的麻烦。因此,在设计过程中需要考察控制通道的抗干扰能力。

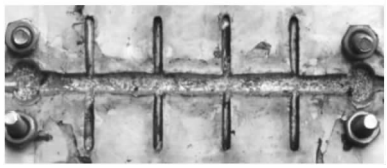
试验 2 中 ϕ1.5 mm 导爆索药量小,在0.5 mm 的间隔下不具备殉爆沟槽装药的能力;试验 7 中的 ϕ1.5 mm 导爆索由于具有金属蒙皮,且在 0.3 mm的间隙下也不可能殉爆沟槽装药;试验 9 中 ϕ1.0 mm 导爆索药装量小于 ϕ1.5 mm 导爆索,控制通道不会受其影响。所以本文对试验 5 中1.3 mm沟槽装药对 ϕ1.0 mm 导爆索的影响程度进行了试验研究。试验装置如图 7 所示,横向通道为 1.3 mm × 1.3 mm 沟槽装药,代表信号通道;8 个纵槽中装有 ϕ1.0 mm 导爆索,代表控制通道。

根据图 7 可知,8 个控制通道的沟槽宽度都明显变大,这说明当信号通道起爆后,使得控制通道纵槽内的 8 根导爆索全部引爆。因此,以上结果可以说明在此种沟槽装填配置下,信号通道会对没有输入的控制通道产生影响。

基于以上结果,在工程应用中可采用试验中成功的沟槽装填物质配置方案,以提升爆炸逻辑零门的存储、运输稳定性,降低装填工艺需求,为爆炸逻辑网络的设计提供参考。



(a) 爆炸前状态
(a) Pre-explosion state



(b) 爆炸后状态
(b) Post-explosion state

图 7 通道作用效果试验图
Fig. 7 Channel action effect test

4 结论

本文采用以导爆索代替部分沟槽装药结构的方法,设计了几种导爆索和沟槽装药结合的零门结构,以增强爆炸零门稳定性和降低沟槽装药装填工艺。通过大量实验,得到控制通道对信号通道的控制作用有如下规律:

1)当信号通道内导爆索直径一定时,若存在间隙,则间隙宽度越小,控制通道越容易截断信号通道;若不存在间隙,随着信号通道内沟槽装药尺寸的不同,零门的成功比例也不同,并且会存在一个最佳的沟槽装药尺寸。

2)控制通道为导爆索,而信号通道为沟槽装药的组合类型要优于控制通道为沟槽装药,而信号通道为导爆索的组合类型。

3)当控制通道和信号通道均为导爆索时,若控制通道内导爆索的直径大于信号通道内导爆索的直径,则零门的成功比例较高。

此外,基于大量的试验结果,还得到了几种较优的设计方案,即 3#、5#、9#、13#。以上组合方案可为工程应用设计提供参考,以保证爆炸零门装置的稳定性和可靠性。

参考文献(References)

[1] 罗华平, 黄亨建, 吴奎先, 等. 一种新型爆炸逻辑零门设计研究[J]. 含能材料, 2005, 13(z1): 36 - 38.
LUO Huaping, HUANG Hengjian, WU Kuixian, et al. Study on a new explosive logic null gate [J]. Energetic Materials, 2005, 13(z1): 36 - 38. (in Chinese)

[2] Silvia D A, Ramsey R T, Spencer J H. Explosive gate, diode and switch: United States Patent 3430564 [P]. 1969 - 03 - 04.

[3] Silvia DA. Explosive circuits: United States Patent 3728965 [P]. 1973 - 04 - 24.

[4] Silvia D A, Ramsey R T. Explosive elements: United States Patent 3496868 [P]. 1970 - 02 - 24.

[5] Meyers W H. Design of explosive logic elements [C]// Proceedings of Symposium on Explosives and Pyrotechnics, 1984.

[6] 冯长根. 小尺寸微通道爆轰学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
FENG Changgen. Detonation of small size microchannel [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999. (in Chinese)

[7] 刘举鹏, 陈福梅. 炸药中爆轰波拐角绕射现象研究[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(2): 105 - 109.
LIU Jupeng, CHEN Fumei. Studies on the detonation wave turning around a corner [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(2): 105 - 109. (in Chinese)

[8] 王树山, 焦清介, 冯长根. 爆炸逻辑元件的研究[J]. 火工品, 1994(2): 1 - 3, 12.
WANG Shushan, JIAO Qingjie, FENG Changgen. Development of explosive logic element [J]. Initiators & Pyrotechnics, 1994(2): 1 - 3, 12. (in Chinese)

[9] 焦清介, 吉利国, 蔡瑞娇. 爆炸逻辑零门可靠性研究[J]. 兵工学报, 1997, 18(2): 116 - 120.
JIAO Qingjie, JI Liguo, CAI Ruijiao. Reliability study on the design of explosive logic null gate [J]. Acta Armamentarii, 1997, 18(2): 116 - 120. (in Chinese)

[10] 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 Bailin, LU Fangyun, LI Xiangyu, 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. (in Chinese)