DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0560-06

一种爆炸二极管机理研究及熄爆通道尺寸对其性能的影响*

王 飞,马宏昊,沈兆武,崔 宇
(中国科学技术大学近代力学系,安徽 合肥 230027)

摘要:依据爆炸逻辑元件的工作原理设计了一种爆炸二极管。实验研究了元件内部结构,确定了关键参数为熄爆通道的长度、隔爆序列。隔爆序列内采用激发装置、一次 PETN 装药、两次 PETN 装药不同密度分层装药序列。在 A、B 端连接导爆索,改变熄爆通道尺寸,确定分层装药参数,进行传爆可靠性、隔爆安全性实验。结果表明:爆轰信号由 A 端正向输入时,可以顺利通过 10～35 mm 的熄爆通道并且可靠引爆 B 端导爆索,满足可靠性功能;爆轰信号由 B 端反向输入,在熄爆通道长度为 15～35 mm 时,爆轰信号在通过隔爆序列、熄爆通道时被可靠阻断无法引爆 A 端导爆索,满足隔爆安全性功能。最终元件选取长度为 15～35 mm 的熄爆通道,确定不同密度分层装药参数作为设计标准。应用于爆破网络设计中,使爆轰波信号在网络中单向传播,增加了网络的安全性。

关键词:爆破安全网络;爆炸二极管;隔爆序列;熄爆通道
中图分类号:O389 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

爆炸逻辑网络是美国在 20 世纪 60 年代率先研制的一种由爆炸逻辑元件和火工品等构成的传爆网络,该网络具有布尔逻辑判断能力和类似电子电路的信号处理功能,其输入端接雷管,输出端接传爆元件,中间接爆炸逻辑元件[1-3],可对不同输入端爆轰信号做出逻辑判断,选择是否输出或以何种方式输出。传统的工程爆破网络有导爆管连接网络、导爆索连接网络、电雷管连接网络、混合连接网络等。在工程应用中,爆轰波在导爆索连接的网络中的传播方向具有不可控性。也就是说,爆轰信号可以从主网络输入传至各子网络达到常规起爆效果。反之在使用导爆索连接的爆破网络中,如果网络中某处子网络出现爆轰信号误输入,即可能通过子网络导爆索反向引爆整个主网络。近年来在高温火区煤矿爆破开采过程中已经发生过重大安全事故,原因皆是在高温火区爆破作业中子网路炮孔发生早爆、误爆引发整个起爆网路误爆,这些事故严重威胁了人员的生命安全、影响了矿产资源的开采效率[4]。在火区爆破网络设计中,由于炮孔内部有着不同程度的高温环境,即使通过降温或者耐高温隔热保护措施,电雷管、导爆管也不适合在此复杂条件下使用,相比之下导爆索传爆可靠、耐温性能好[5]是火区爆破网络设计必须采用的火工品。关于高温火区爆破领域,对于提高整个爆破网路的安全性研究较少。在子网路由于某处意外原因,如高温、放电、刺穿等,发生单个炮孔的早爆、误爆引发整个爆破网路的误起爆时,孔内导爆索与炸药耐高温性能相比更容易成为误起爆的主因[6-7]。如果有一种技术能够实现爆轰信号在导爆索网络中传播方向的可控制性,使爆破网络中的爆轰信号仅能够从希望的方向传爆,实现爆轰信号传播的单向性,即不可逆性。当炮孔中子网络发生误起爆时阻止爆轰信号传播至主网络,从而避免主网络被误起爆,保护了主网络的安全,解决工程爆破中一类重要的安全问题。本文中设计出这样一种具有逻辑功能的爆炸二极管元件,通过控制爆轰信号在网络中的传播方向实现上述功能,为爆破网络的设计增加安全性[8]。

* **收稿日期**:2015-10-26; **修回日期**:2015-12-19
基金项目:国家自然科学基金项目(51374189,51174183);安徽省自然科学基金项目(1508085ME85)
第一作者:王 飞(1987—),男,博士研究生; **通信作者**:马宏昊,hhma@ustc.edu.cn。

1　元件结构介绍

设计的爆炸二极管[9]如图 1 所示，元件结构包括两端敞口外壳、中空橡胶结构、熄爆通道、隔爆序列、两端密封件、爆轰信号输入端（即 A 端）、爆轰信号输出（即 B 端），A、B 端可以根据使用插入导爆索、金属导爆索火工品。元件外壳、隔爆序列外壳、激发内帽全部由金属材料钢或铁制成。元件外壳内表面与密封件、中空橡胶结构、熄爆通道、隔爆序列过盈配合。隔爆序列是一端开口、一端封闭的敞口筒形壳体，通过卡口固定位置，其内部由激发装置和不同密度分层钝感装药构成，为了避免激发药在激发内帽中流动，在激发药上方压盖蜡纸密封。

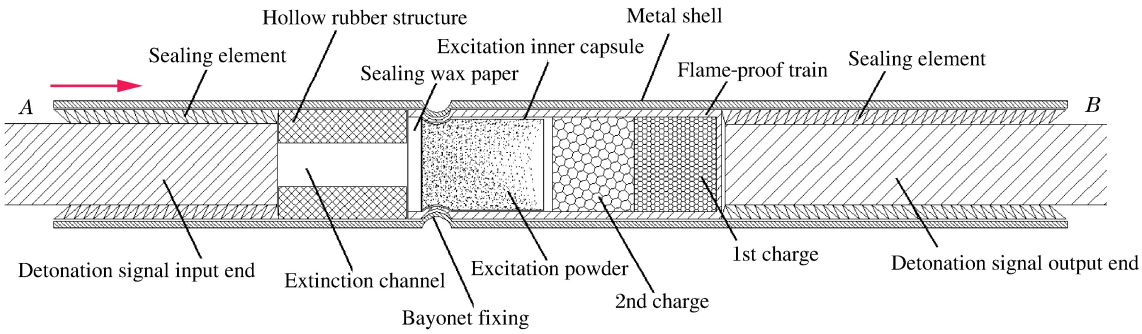


图 1　爆炸二极管元件结构示意图

Fig. 1　The structural diagram of the designed explosive diode

图 1 中隔爆序列结构内部由分层装药[10]构成：底层一次装药为高密度造粒钝化后的 PETN，密度为 1.2～1.3 g/cm^3；中层二次装药为松散密度下造粒钝化后的 PETN，密度为 0.9～1.0 g/cm^3；上层激发装置由激发药与激发内帽组成，激发药组分为 PETN/石墨/铝粉/氧化剂，密度为 0.8 g/cm^3。元件中隔爆序列结构借鉴杜建国等[11]无起爆药激光点火雷管中的激发装药结构。在正向传爆时，杜建国等[11]采用激光点火激发药引爆下层装药结构进行传爆，其不具有反向阻爆的功能。本元件改进了下层装药密度与结构，在激发装置前端添加熄爆通道，正向传爆时，爆轰信号通过熄爆通道点燃激发装置及下层装药后进行稳定传爆；反向传爆过程中，爆轰信号反向通过隔爆序列时能量衰减直至熄灭于熄爆通道中，从而达到反向阻爆的效果。

2　实　验

2.1　传爆可靠性实验

以传爆实验法[12]为主，爆炸二极管正向接入网络，规定元件爆轰信号由 A 端输入、B 端输出为正向接入网络，反之为反向。在 A、B 端插入线密度为 14.0 g/m 的工业导爆索，熄爆通道长度为 10 mm，B 端导爆索固定在厚度为 0.5 mm 的铁板上作为实验端。将整个爆炸网路部分放置于空中爆炸罐中，以一发 8＃工业雷管起爆 A 端导爆索，检验爆轰信号能否由 A 端正向可靠传爆至 B 端。结构示意图如图 2 所示，传爆实验如图 3 所示。

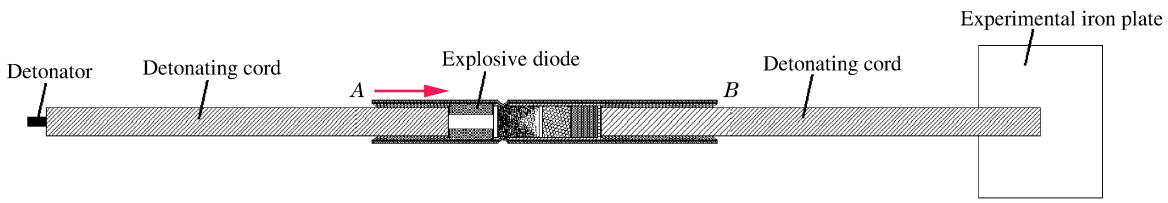


图 2　传爆实验结构示意图

Fig. 2　Illustration of explosion testing system

在传爆实验中传爆效果是本文中关注的逻辑功能，爆轰波能否在网路中顺利传播是关键所在。其关键设计参数为图 3 中 B 端不同线密度的导爆索与元件内熄爆通道长度，在图 3 实验的基础上，在 A 端插入工业用导爆索，B 端插入不同线密度的导爆索[13]并且调整熄爆通道长度进行多组实验来检验其传爆效果。实验中 A 端导爆索的直径和线密度分别为 5.5 mm 和 14.0 g/m。B 端导爆索的直径和线密度分别为 2.5 mm，2.4 g/m；3.0 mm，4.0 g/m；3.5 mm，6.7 g/m；4.0 mm，9.7 g/m；5.0 mm，12.0 g/m；5.5 mm，14.0 g/m。熄爆通道长度为 10、15、25、35 mm。共进行 24 组实验。实验得知：A 端输入稳定爆轰信号经过熄爆通道的衰减后，可以点燃激发药装置及下层装药进行稳定传爆，从而可靠引爆 B 端线密度为 2.4～14.0 g/m 的导爆索，该结构正向传爆稳定可靠，满足网络设计的传爆要求。

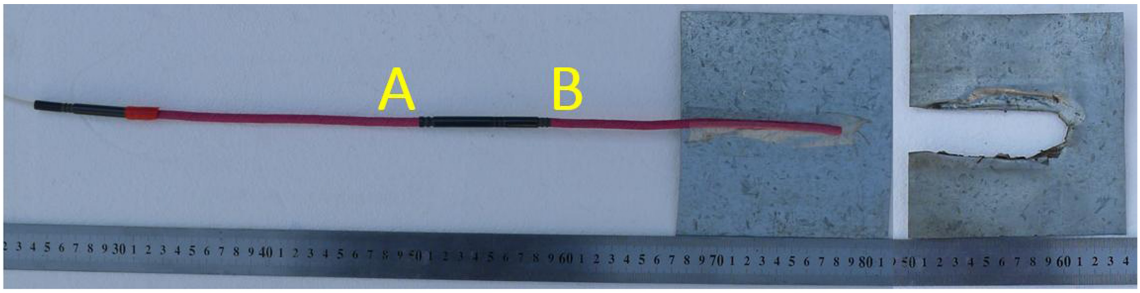


图 3 传爆实验及结果

Fig. 3 Explosion test method and results

2.2 隔爆安全性实验

实验方法同上，元件反向接入实验网络，如图 4 所示。熄爆通道长度为 10 mm 时，在 B 端插入线密度为 9.7 g/m 的导爆索，在 A 端插入线密度为 14 .0 g/m 的导爆索，如图 5(a)所示；熄爆通道长度为 15 mm时，在 B 端插入线密度为 14.0 g/m 的导爆索，在 A 端插入线密度为 14.0 g/m 的导爆索，如图 5(b)所示，A 端导爆索固定在厚度为 0.5 mm 的铁板上作为验证端。将整个网路放置于空中爆炸罐中，以一发 8＃工业雷管起爆 B 端导爆索，检验该元件能否阻止爆轰信号由 B 端至 A 端的传播，实现隔爆安全效果。

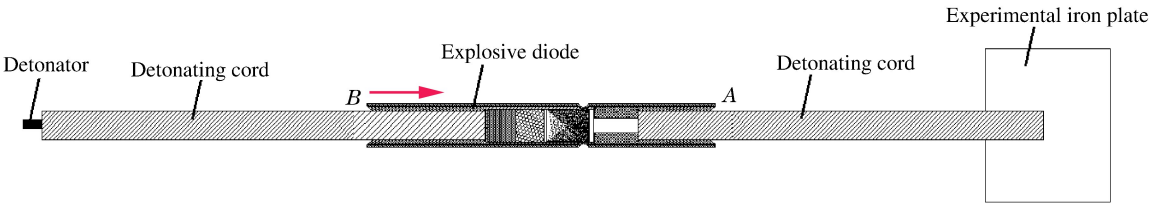
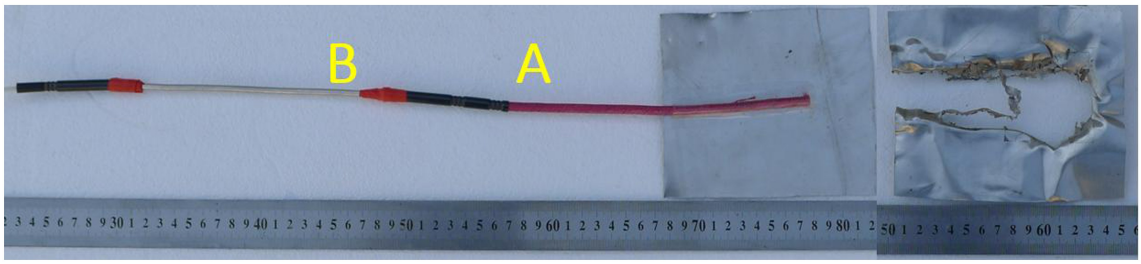


图 4 隔爆安全性实验系统示意图

Fig. 4 Illustration of explosion-proof safety testing system

在隔爆安全性实验中隔爆效果是本文中关注的逻辑功能，其关键设计参数为图 4 中 B 端不同线密度的导爆索以及元件内熄爆通道长度。在图 4 实验的基础上，A 端插入工业用标准导爆索，B 端插入不同线密度的导爆索并且调整熄爆通道长度进行多组实验来检验其隔爆效果。实验中 A 端导爆索的直径和线密度分别为 5.5 mm 和 14.0 g/m。B 端导爆索的直径和线密度分别为 2.5 mm，2.4 g/m；3.0 mm，4.0 g/m；3.5 mm，6.7 g/m；4.0 mm，9.7 g/m；5.0 mm，12.0 g/m；5.5 mm，14.0 g/m。熄爆通道长度为 10、15、25、35 mm。共进行 24 组实验。实验得知：熄爆通道长度为 10 mm 时，B 端输入导爆索线密度在 9.7 g/m 及以上爆轰信号时可以击穿隔爆序列、熄爆通道引爆 A 端导爆索；熄爆通道长度为 15～35 mm 时，B 端输入爆轰信号在通过隔爆序列、熄爆通道时被可靠阻断无法引爆 A 端导爆索，实现隔爆安全功能，满足网络设计的安全可靠性。

(a) Failed explosion-proof



(b) Successful explosion-proof

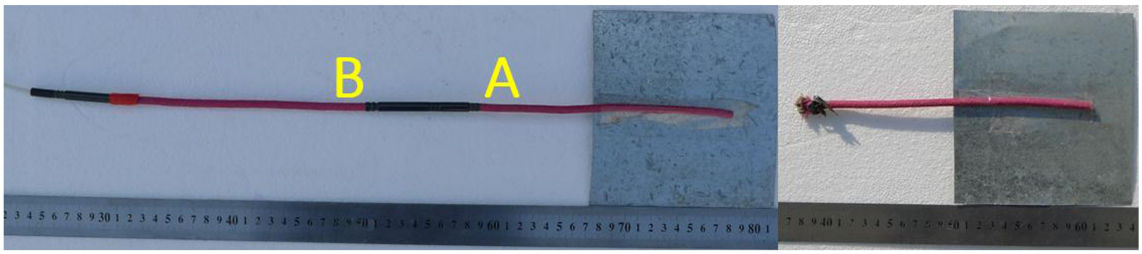


图 5 隔爆安全性实验

Fig. 5 Explosion-proof safety experiment

3 结果分析及机理解释

3.1 结果分析

在传爆可靠性实验中，引爆 A 端线密度为 14.0 g/m 的导爆索时，爆轰信号可以顺利通过长度为 10～35 mm 的熄爆通道由 A 端传播至 B 端，引爆 B 端线密度为 2.4～14.0 g/m 的 6 种导爆索，满足可靠性功能。由传爆可靠性实验结果可知，在爆破网络设计中元件 A 端插入导爆索能量越大时，其传爆效果越佳，因此在 A 端插入线密度为 14.0 g/m 的导爆索可以顺利引爆 B 端导爆索及火工品，满足工程应用需要。

在隔爆安全性实验中，在熄爆通道长度为 10 mm，B 端导爆索线密度为 2.4～6.7 g/m 时，由于爆轰信号能量较小，无法顺利通过隔爆序列、熄爆通道，从而熄灭；B 端导爆索线密度在 9.7 g/m 及以上时，由于殉爆能量过大，引爆 A 端导爆索。在熄爆通道长度为 15～35 mm 时，分别引爆 B 端线密度为 2.4～14.0 g/m 的 6 种导爆索，在以上多组实验中，爆轰信号由 B 端传播至 A 端的过程中被顺利阻断，并且无法通过殉爆引爆 A 端导爆索，从而满足元件隔爆安全性功能。由隔爆安全性实验知，在爆破网络设计中，在熄爆通道长度为 15～35 mm 时，爆炸二极管满足隔爆要求，顺利阻断来自 B 端误起爆产生的爆轰信号，从而保护 A 端的网络不被误起爆。最终选取 15～35 mm 作为熄爆通道的最佳设计长度，采用确定的分层装药隔爆序列设计出实现逻辑功能的爆炸二极管。

3.2 机理解释

元件可靠性传爆机理为：A 端输入稳定爆轰信号，爆轰波传播至小尺寸熄爆通道衰减至冲击波，冲击波和爆轰气体产物在熄爆通道中传播，通过熄爆通道后引燃隔爆序列上层激发装置，利用激发药爆炸后产生的高温高压气体和能量快速剪切激发装置底部密封端形成高速运动撞击片，产生大量热点和强冲击效应[14-15]，极短时间内撞击激发装置下层低密度钝化装药引起爆轰，继续引爆底层高密度钝化装药进行爆轰传递，传爆过程中隔爆序列内药体的激发感度由高到低逐级降低，爆轰能量由低到高逐级增大，从而撞击隔爆序列封闭端一侧的火工品，使之顺利正向传爆。隔爆安全性机理为：B 端误输入爆轰信号时，爆轰信号由 B 端传播至隔爆序列封闭端底部，在约束条件下减弱了爆轰波传播能量，又因底层高密度钝化装药热点少、起爆感度低，冲击波最终经过隔爆序列在熄爆通道中衰减至熄爆，无法通过传

爆或者殉爆引爆 A 端的火工品,实现反向阻爆要求。

熄爆通道尺寸分析:熄爆通道长度过小,B 端有误输入爆轰信号时会在殉爆作用下试图传爆 A 端的起爆器材,当殉爆能量过大时该元件会击穿引爆 A 端的爆破器材,失去了原有设计的隔爆安全控制功能;熄爆通道长度过大,从 A 端输入的爆轰信号经过熄爆通道时,冲击波衰减过度导致无法引燃下端激发装置完成爆轰信号由 A 至 B 的顺利传爆。经过多组实验验证分析,15～35 mm 可作为元件最佳熄爆通道长度,长度过大传爆可靠性降低,长度过小隔爆安全性降低。

4 结 论

(1)实验室设计并制备了一种爆炸二极管元件,该元件正向接入网络时可以实现正方向爆轰信号的可靠传播,阻止反方向爆轰信号的逆向传播。

(2)在传爆可靠性实验中,爆轰信号可以顺利通过长度为 10～35 mm 的熄爆通道并且引爆输出端不同线密度的导爆索,传爆效果可靠。

(3)在隔爆安全性实验中,熄爆通道长度为 10 mm 时,B 端输入导爆索线密度在 9.7 g/m 及以上爆轰信号时可以击穿隔爆序列引爆 A 端导爆索;熄爆通道长度为 15～35 mm 时,爆轰信号反向输入通过隔爆序列、熄爆通道时被顺利关闭无法引爆 A 端导爆索,满足隔爆安全性。

(4)选取 15～35 mm 作为熄爆通道最佳设计长度,采用确定的分层装药隔爆序列设计出实现逻辑功能的爆炸二极管。

参考文献:

[1] 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.
Wang Shushan, Jiao Qingjie, Feng Changgen. Development of explosive logic element[J]. Initiators and Pyrotechnics, 1994(2):1-3.

[2] 吉利国,焦清介,蔡瑞娇,等.单输出爆炸逻辑网络系统安全可靠性研究[J].北京理工大学学报,1997,17(4):444-450.
Ji Liguo, Jiao Qingjie, Cai Ruijiao, et al. On the safety and reliability of explosive logic networks with one output [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 1997,17(4):444-450.

[3] 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(B12):36-38.
Luo Huaping, Huang Hengjian, Wu Kuixian, et al. Study on a new explosive logic null gate[J]. Chinese Journal of Energetic Material, 2005,13(B12):36-38.

[4] 朱月敏.煤矿安全事故统计分析[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012.

[5] 廖明清,孙孚锜.普通导爆索在高温爆破中的应用[J].爆破器材,1991(1):19-21.
Liao Minqing, Sun Fuqi. Applications of common detonating fuses in high-temperature blasting jobs[J]. Explosive Materials, 1991(1):19-21.

[6] 蔡建德,李战军,傅建秋,等.硐室爆破时高温硐室装药的安全防护试验研究[J].爆破,2009,26(1):92-95.
Cai Jiande, Li Zhanjun, Fu Jianqiu, et al. Experimental research on safety protection of chamber blasting charging in high temperature chamber[J]. Blasting, 2009,26(1):92-95.

[7] 李建军,汪旭光.乳化炸药热点火的实验研究[J].工程爆破,1997,3(2):23-27.
Li Jianjun, Wang Xuguang. Experimental study on thermal ignition for emulsion explosives[J]. Engineering Blasting, 1997,3(2):23-27.

[8] 王军波,杨帆.马尔可夫理论在爆炸逻辑网络安全性与可靠性分析中的应用[J].火工品,1998(4):18-21.
Wang Junbo, Yang Fan. Application of Marlkov theory in safety and reliability analysis for the explosive logic network[J]. Initiators and Pyrotechnics, 1998(4):18-21.

[9] 马宏昊,王飞,沈兆武.一种单向传爆门元件和使用该元件实现爆炸网路的单向可靠传爆的方法:CN103759602A[P].2014.

[10] 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,2008:22-23.

[11] Du Jianguo, Ma Honghao, Shen Zhaowu. Laser initiation of non-primary explosive detonators[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013,38(4):502-504.

[12] 龚翔. 小药量柔性导爆索的传爆可靠性[J]. 火工品,1998(1):1-5.
Gong Xiang. Detonation transfer reliability of mild detonating fuse with small core load[J]. Initiators and Pyrotechnics, 1998(1):1-5.

[13] 梅群. 低能量导爆索关键技术及应用研究[D]. 合肥,中国科学技术大学,2007.

[14] 章冠人. 热点起爆理论的近似分枝点分析[J]. 爆炸与冲击,1990,10(3):193-197.
Zhang Guanren. Theory of hot spot initiation of explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 1990,10(3):193-197.

[15] 章冠人. 粘弹塑性热点燃烧模型的冲击起爆理论[J]. 爆炸与冲击,1988,8(3):210-214.
Zhang Guanren. Theory of initiation of hot spot in heterogeneous explosive with visco-elastic-plastic and combustion model[J]. Explosion and Shock Waves, 1988,8(3):210-214.

Mechanism of an explosion diode and effects of its extinction channel size on its properties

Wang Fei, Ma Honghao, Shen Zhaowu, Cui Yu

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui*, *China*)

Abstract: An explosive diode was designed according to the principle of explosive logic components. This paper studied thorough experiment of the internal structure of the components to identify the length of extinction channel and flame-proof structure as key parameters. The flame-proof structure adopted the layered charges of different density including an excitation device, 1st charge of PETN, 2nd charge of PETN. Connecting the *A*-end and *B*-end to the detonating cord, changing the size of the extinction channel, ensuring the parameter of the layered charge to conduct the experiment of detonation reliability and explosion-proof safety, the results show that the detonation signal can detonate the *B*-end detonating cord, satisfying the reliability function while passing through the extinction channel of 10 mm to 35 mm by inputting from the *A*-end. While the detonation signal input from the *B*-end was not able to detonate the *A*-end detonating cord to meet the flame-proof function across the flame-proof structure and extinction channel when the length of the extinction channel is 15 to 35 mm. The result indicates the length of the extinction channel amongst 15 mm to 35 mm and the layered charge of different densities can be selected as the design standard of the blasting network to make the denotation signals transmit in one direction in the network, thus increasing the security of the network.

Keywords: blasting network; explosive diode; flame-proof structure; extinction channel

(责任编辑　张凌云)