

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.05.007

# 电子雷管小孔距爆破拒爆试验研究\*

刘忠民<sup>①</sup> 杨年华<sup>②③</sup> 石磊<sup>①</sup> 郭立峰<sup>①</sup> 杨军<sup>②</sup> 徐靖宇<sup>①</sup>

①北京市公安局(北京,100011)

②北京工程爆破协会(北京,100081)

③中国铁道科学研究院集团有限公司(北京,100081)

[摘 要] 电子雷管由于具有安全、可控、可追溯等特点,对民用爆炸物品安全管控及社会安全稳定提供了良好的解决方案。但在井下小孔距爆破中发现,电子雷管拒爆率偏高,严重地影响了爆破安全和电子雷管的推广应用。根据现场模拟试验的结果,分析了小孔距爆破中电子雷管拒爆的原因,发现电子雷管抗冲击振动性能较差,从而出现引火药头被振碎、芯片数据混乱及电容漂移等问题。通过对比不同厂家的电子雷管爆破效果认为,选用高质量、高可靠性的电子雷管,采用合适的起爆方式,可有效地防止电子雷管拒爆。

[关键词] 电子雷管;拒爆;爆炸冲击;炮孔间距

[分类号] TD235.2;TQ563

## Experimental Study on Misfire in Small Hole-Space Blasting of Electronic Detonator

LIU Zhongmin<sup>①</sup>, YANG Nianhua<sup>②③</sup>, SHI Lei<sup>①</sup>, GUO Lifeng<sup>①</sup>, YANG Jun<sup>②</sup>, XU Jingyu<sup>①</sup>

①Beijing Public Security Bureau (Beijing,100011)

②Beijing Association of Engineering Blasting (Beijing,100081)

③China Academy of Railway Sciences Co.,Ltd. (Beijing,100081)

[ABSTRACT] Electronic detonators provide a good solution to the safety control of civil explosives and social security and stability due to their features of safety, controllability and traceability. However, it is found that the misfired rate is high in the underground small hole-space blasting. The blasting safety and popularization and application of electronic detonators are seriously affected. This paper is based on the field simulation test results. The main reason of electronic detonator failure in small hole-space blasting is the poor anti-shock vibration performance of electronic detonator. Then there are some problems such as the pulverizing head being broken by vibration, chip data disturbance and capacitor drift. By comparing the blasting effect of electronic detonators from different manufacturers. It is considered that the electronic detonator with high quality and high reliability and the proper initiation mode can effectively prevent the electronic detonator from failing to detonate.

[KEYWORDS] electronic detonator; misfire; explosive impact; blasting hole spacing

## 引言

电子雷管是一种可以任意设定并准确实现延期发火时间的智能雷管产品,其本质是在雷管脚线与基础雷管之间采用微电子芯片替代普通雷管中的化学延期药与电点火元件<sup>[1-2]</sup>。电子雷管不仅具有延时范围广、延时精度高、可靠性高等技术优势,还具有定位管控、三码绑定等安全管理的优势<sup>[3]</sup>,现已

在大量工程实践中推广应用。北京市已在全市区域内的爆破工程中全面使用电子雷管;但是由于电子雷管操作复杂、流程烦琐,导致使用初期出现了多种问题,形成不安全因素,进而影响施工。尤其在施工期间出现的雷管拒爆现象令人担忧,在隧道和桩井爆破工程中,因小孔距和起爆时差较大等因素出现拒爆现象偏多。

为弄清此类问题发生的原因,提高爆破工程中使用电子雷管的安全性,及时解决在使用电子雷管

\* 收稿日期:2021-06-22

第一作者:刘忠民(1975-),男,中队长,主要从事爆炸物品安全管理。E-mail:wgchz163.com

通信作者:杨年华(1964-),男,研究员,博士,主要从事爆破工程和技术研究。E-mail:1848499688@qq.com

爆破施工中遇到的难题,在北京昌平凤山矿和延庆昌赤路隧道施工现场开展电子雷管小孔距条件下抗冲击拒爆试验。选取不同厂家的电子雷管进行强冲击拒爆试验,对比电子雷管的强冲击拒爆情况,分析电子雷管受冲击的拒爆原因,从而优选出质量安全可靠的电子雷管。

1 拒爆试验方法及实施

1.1 试验 I :昌平凤山矿试验

试验地点在昌平凤山石灰石矿 314-328 平台。选取甲厂生产的电子雷管,分别采用孔底起爆和孔口起爆两种起爆方式,共完成 5 次试验。试验炮孔剖面见图 1。

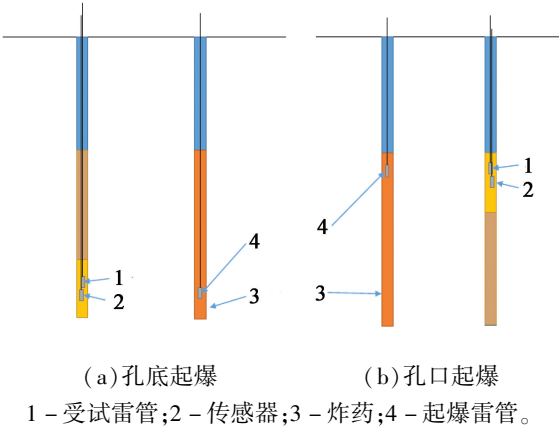


图 1 试验炮孔剖面图  
Fig. 1 Profile of test holes

采用中心炮孔单发电子雷管起爆。其他不同间距测试孔布置在爆破孔四周,每个测试孔中都安装模拟药包及 1 发受试电子雷管。当中心炮孔起爆后再取出测试孔中电子雷管,检测其受邻孔爆炸冲击振动影响后的状态。

设计的炮孔布置平面如图 2 所示。1#~8#炮孔为中心对称的两组,共 16 个炮孔,分别距中心爆破孔 15~50 cm 不等。为确保试验安全,受试炮孔中用面团替代乳化炸药,将 16 个测试孔各装入 1 节圆柱状面团,并使电子雷管在圆柱状面团中心。一方面确保电子雷管在模拟炸药卷中接受中心孔爆炸冲击,另一方面防止在取出受试电子雷管时发生炸药爆炸的意外事故。试验场地经预先踏勘挑选,地质条件为比较均质的厚层石灰岩。试验设计钻凿的炮孔深度 1 m,直径 40 mm,角度 90°,孔口堵塞长度 40 cm。使用麻绳混合炮泥堵塞炮孔,以方便后序取出受试电子雷管。中心爆破孔装入 $\varnothing 32$  mm 乳化炸药药卷,药量从 400 g 逐渐增大至 600 g。

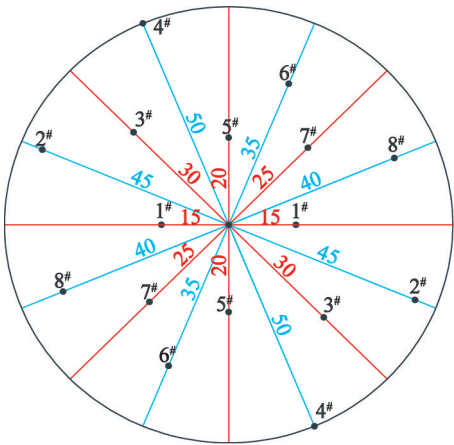


图 2 试验 I 炮孔布置设计图(单位:cm)  
Fig. 2 Layout design drawing of blast holes  
in Test I (unit:cm)

为保证试验安全,对中心炮孔用炮被进行覆盖,中心炮孔起爆 15 min 后移开炮被,逐孔检测各受试电子雷管,并记录所有受试雷管是否还处于正常状态。随后,将炮孔口堵塞的麻绳混合炮泥清理干净,取出面团中的受试电子雷管。

试验发现,距离爆破孔很近或有裂隙与爆破孔连通的受试孔中有电子雷管被压扁的现象。其他被清理出的电子雷管都用专用电子雷管检测仪检测,可正常注册组网起爆的,由专用电子雷管起爆器直接组网再起爆;若雷管检测不正常,则分析原因后再与其他正常雷管绑扎,用爆破法起爆销毁,并在民爆管理网上人工注销其雷管号。

1.2 试验 II :延庆昌赤路隧道内试验

试验 I 完成后,根据爆破效果对孔网参数做出一些调整,在延庆昌赤路隧道底板上进行了电子雷管抗冲击安全试验 II。在隧道仰拱开挖工作面共进行了 3 次爆破试验,认为中心炮孔的药量为 600 g,比较符合实际。试验中,将乙、丙两个不同厂家的电子雷管一同放入受试孔中,也对比了采用孔底起爆和孔口起爆两种起爆方式的试验结果。

试验中尽量模拟桩井爆破的真实条件,在中心孔装药起爆,中心炮孔药卷直径 32 mm,两卷乳化炸药药量 600 g;设计的炮孔平面布置见图 3。所有钻孔深度 1 m,直径 40 mm,角度 90°。1#~8#模拟炮孔共 8 个,分别距中心爆破孔 15~50 cm 不等。装药前需要实际测量各炮孔至中心爆破孔的真实距离。为确保试验安全,同时使电子雷管处于相似药卷环境中,测试孔内仍采用面团替代乳化炸药。每个测试炮孔内同时放入乙、丙两厂家的各 1 发电子雷管,将电子雷管插入圆柱状面团内,依次按照 1#~8#的

顺序放置于炮孔中。使用麻绳混合炮泥堵塞炮孔,保证每孔填塞长度达 40 cm 以上。

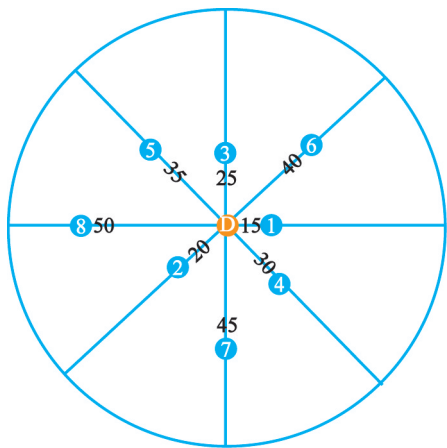


图 3 试验 II 炮孔布置设计图(单位:cm)  
Fig. 3 Layout design drawing of blast holes  
in Test II (unit:cm)

在起爆中心炮孔后,等待 15 min 通风排烟,检查并记录受试电子雷管状况。随后,将麻绳混合炮泥清理干净,最后将所有测试雷管清出炮孔,并用电子雷管检测仪检测受试电子雷管,若可正常注册起爆,就直接起爆销毁;对于检测不正常或拒爆的雷管,做好观察记录,通知厂方解剖分析,并妥善处置。

## 2 试验结果与分析

在昌平凤山矿和延庆昌赤路隧道进行的电子雷

管抗冲击拒爆试验中,采用甲、乙、丙 3 个不同厂家的电子雷管,共计 128 发,其中受爆炸冲击损坏而不能正常起爆的电子雷管 14 发,总计拒爆率 10.9%。

当中心爆破孔炸药量为 600 g 时,试验 I 中进行了 1 组试验,测试了 16 个炮孔;试验 II 中进行了 3 组试验,测试了 24 个炮孔。此时,由表 1 ~ 表 2 可知,距离中心爆破孔小于 22 cm 的受试孔内电子雷管拒爆严重:试验 I 的 4 个受试炮孔中,甲厂的 4 发雷管有 2 发拒爆,拒爆率 50.0%;试验 II 的 6 个受试炮孔中,乙厂的 6 发雷管有 4 发拒爆,拒爆率达 66.7%,而丙厂的 6 发雷管无拒爆。同样,取中心爆破孔炸药量为 600 g,当测试炮孔距离中心爆破孔 25 ~ 45 cm 时,试验 I 的 10 个受试炮孔中,甲厂的 10 发雷管有 5 发拒爆,拒爆率 50.0%;试验 II 的 15 个受试炮孔中,乙厂的 15 发雷管有 1 发拒爆,拒爆率 6.6%;丙厂的 15 发雷管无拒爆。测试炮孔距离中心爆破孔大于 50 cm 后,所有电子雷管再无拒爆现象。这充分说明,炮孔间距过小且有较大起爆时差的情况下,先爆炮孔可能会对邻近炮孔内的电子雷管造成强烈冲击,导致延期电子雷管拒爆。

不同厂家生产的雷管产品质量差异较大(表 1 ~ 表 2)。孔底起爆方式,600 g 药爆破时,最差的电子雷管拒爆率达 43.8%,最好厂家的电子雷管拒爆率为零。试验后了解到,拒爆率为零的生产厂家在电子雷管封装环节,增加了芯片保护层,这种保护层能有效减小小爆炸冲击振动带来的干扰,可防止电子雷管受振拒爆。因为试验次数有限,中心孔装药量

表 1 试验 I 的实测结果  
Tab. 1 Measured results of test I

序号	中心炮孔 药量/g	起爆 位置	受试雷管 发数(甲厂)	受试雷管拒 爆炮孔个数	拒爆雷管孔至中心 爆破孔实测距离/cm	拒爆情况说明	拒爆率/ %
1 <sup>#</sup>	600	孔底	16	7	15、20、25、30、40、40、45	注册正常,但不能起爆	43.8
2 <sup>#</sup>	500	孔底	16	1	15	殉爆,不能下载密码	6.3
3 <sup>#</sup>	400	孔底	16	1	12	管壳压扁,无法注册	6.3
4 <sup>#</sup>	400	孔口	16	0			0
5 <sup>#</sup>	400	孔口	16	0			0

表 2 试验 II 的实测结果  
Tab. 2 Measured results of test II

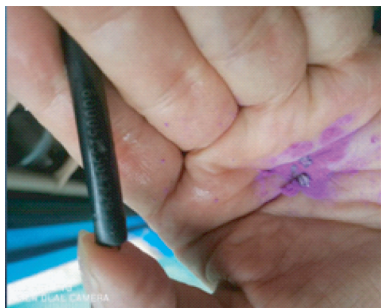
序号	中心炮孔 药量/g	起爆 位置	受试雷管发数		受试雷管拒 爆炮孔个数	拒爆雷管孔至中心 爆破孔实测距离/cm	拒爆情况说明	拒爆率/ %
			乙厂	丙厂				
1 <sup>#</sup>	600	孔底	8	8	2	17、21	拒爆雷管都出自乙厂家	25.0
2 <sup>#</sup>	600	孔口	8	8	0			0
3 <sup>#</sup>	600	孔底	8	8	3	15、21、30	拒爆雷管都出自乙厂家, 管壳局部有小坑及变形	37.5



最大仅 600 g, 实际桩井爆破中可能达 800 g, 所以这个拒爆率只能作参考; 此外, 对比孔底起爆方式和孔口起爆方式发现, 孔底起爆对邻孔的电子雷管拒爆影响较大, 孔口起爆试验未发现拒爆雷管。

结合两组试验中 3 家受试电子雷管的对比分析, 发现电子雷管发生拒爆有以下几个方面的原因。

1) 引火药头被振碎。隧道和桩井等掘进工程都是小断面爆破, 炮孔间距相对露天爆破的孔距要小得多, 而且常常是单自由面爆破, 先爆炮孔对邻近炮孔中的电子雷管产生强大的冲击振动; 在这种强大、高频的冲击振动下, 在延期引爆前, 后爆孔内电子雷管的引火药头可能会被振碎, 导致拒爆。试验过程中, 解剖了拒爆的电子雷管, 发现引火药头确实有些被振碎(如图 4), 说明电子雷管的引火药头仍需改进。



(a) 被振碎的药粉



(b) 振后引火药已脱落

图 4 被振碎的引火药头

fig. 4 Pulverized primer head

2) 芯片数据扰乱。电子雷管与普通雷管最大的区别在于前者内部含有芯片, 雷管注册、延时等功能的实现都依赖于芯片, 芯片的可靠性对于电子雷管至关重要。先爆炮孔爆炸瞬间产生巨大冲击能量, 同时使气体电离形成等离子体, 等离子体发出电磁辐射<sup>[4]</sup>, 这种强冲击振动和电磁辐射可能会使芯片中的电路功能产生紊乱, 出现数据混乱或相关信息丢失等现象, 从而导致邻孔内电子雷管拒爆。试验 I 中, 对有些电子雷管在邻孔爆炸后立即重新检测组网, 发现电子雷管可以注册, 但不能起爆, 存放

数周后再注册又能起爆。经过厂家专业人员对电子雷管解剖分析认为, 芯片受强烈振动导致数据混乱的可能性较大, 这类问题还需要更深入的试验研究。

3) 电容发生漂移。在先爆炮孔爆炸产生的强大冲击振动作用下, 有些电子雷管的管壳有压扁或变形情况。电子雷管最终需要内部电容放电才能引爆点火药头, 如果内部电容受到强烈冲击振动、甚至挤压, 导致电容发生漂移, 电容的供电电压就可能改变, 从而导致电路不稳定或造成发火元件不发火, 出现电子雷管拒爆。试验 I 中, 解剖的压扁电子雷管有电容损坏的迹象; 此外, 经专业人员解剖分析, 可以注册但不能引爆的雷管也可能是由于电容发生漂移。

总之, 电子雷管在受到近距离炮孔爆炸冲击作用下发生拒爆的原因比较复杂, 这方面的问题仍需继续深入研究。

### 3 结语

隧道和桩井爆破工程中, 在小孔距爆破且起爆时差小于 20 ms 条件下发现了一些拒爆现象。研究认为, 主要原因是电子雷管受到强烈的冲击振动所致, 现在急需论证和编制电子雷管的抗振标准, 继续改进电子雷管的抗振性能。

模拟现场条件下, 对不同厂家的电子雷管进行强冲击试验, 分析了电子雷管受冲击后发生拒爆的原因, 得到以下几点结论:

1) 在炮孔间距小于 45 cm 的爆破工程中使用电子雷管, 发生拒爆的可能性较高, 应开展相关模拟试验, 选用抗振性能较好的电子雷管。

2) 不同生产厂家的电子雷管产品质量良莠不齐, 芯片、电容的质量以及雷管的封装工艺都对电子雷管的质量、可靠性有重要影响, 应加快电子雷管抗冲击振动标准的编制, 减少爆破工程中电子雷管的拒爆现象。

3) 孔底起爆比孔口起爆的应力波更强, 因此, 孔底起爆对邻孔的电子雷管拒爆影响更大。

### 参 考 文 献

- [1] 高铭, 李勇, 滕威. 电子雷管及其起爆系统评述[J]. 煤矿爆破, 2006(3): 23-26.  
GAO M, LI Y, TENG W. Introduction on electronic detonator and its ignition system[J]. Coal Mine Blasting, 2006(3): 23-26.

(下转第 49 页)

[J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2019,55(4):434-438.

[5] 刘志跃,翟俊昭. 铝铜药型罩射流与侵彻数值模拟[J]. 高压物理学报, 2019,33(6):130-137.  
LIU Z Y, ZHAI J Z. Numerical simulation on the performance of shaped charge with explosively welded aluminum copper liner[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6): 130-137.

[6] 武双章,顾文彬,李旭锋,等. 切割防护门的线型聚能装药参数正交优化设计研究[J]. 爆破器材,2012,41(5):12-16.  
WU S Z, GU W B, LI X F, et al. Study on the orthogonal optimization design of the parameters of linear shaped charge cutting the protective door[J]. Explosive Materials, 2012,41(5):12-16.

[7] 龚文涛,刘健峰,龚先乐,等. 线型聚能切割器结构参数优化设计及应用[J]. 爆破器材,2017,46(6):37-42.  
GONG W T, LIU J F, GONG X L, et al. Structural parameter optimization and application of the linear shaped charge cutter[J]. Explosive Materials, 2017, 46(6): 37-42.

[8] 潘书才,钟明寿,谢兴博,等. 线型聚能切割器水下切割钢板性能的数值模拟研究[J]. 爆破器材,2017,46(6):31-36.  
PAN S C, ZHONG M S, XIE X B, et al. Numerical simulation on underwater plate cutting performance of linear shaped charge cutter[J]. Explosive Materials, 2017, 46(6):31-36.

[9] ELSHENAWY T, ELBEIH A, LI Q M. Influence of target strength on the penetration depth of shaped charge jets into RHA targets[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018,136:234-242.



(上接第 42 页)

[2] 欧仙荣. 数码电子雷管中影响点火头性能因素分析[J]. 四川兵工学报,2014,35(5):128-131.  
OU X R. Influencing factors of digital detonator match-head performance[J]. Journal of Sichuan Ordnance Engineering, 2014,35(5):128-131.

[3] 邓重阳,张海艳,莫颖. 数码电子雷管及其推广应用[J]. 采矿技术,2020,20(3):146-148.

[4] 王长利,李迅,刘晓新,等. 典型炸药爆炸过程的电磁辐射实验研究[J]. 兵工学报,2014(增2):188-192.  
WANG C L, LI X, LIU X X, et al. The experimental research on the electromagnetic radiation aroused by detonation of explosive[J]. Acta Armamentarii, 2014( Suppl. 2):188-192.

[5] 张文洲,孙磊. 钛粉对电子雷管电引火药头性能的影响[J]. 爆破器材,2019, 48(2):43-46.  
ZHANG W Z, SUN L. Effect of titanium powder on performances of electric fusehead of electric detonator[J]. Explosive Materials, 2019,48(2):43-46.

[6] 杨文,岳彩新,宋家良,等. 数码电子雷管抗静电性能研究[J]. 火工品,2021(1):9-11.  
YANG W, YUE C X, SONG J L, et al. Research on anti-static performance of digital electronic detonator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(1):9-11.

[7] 林文斌,赖远标,余晖,等. 工业电子雷管盲炮产生原因分析及其处理措施[J]. 现代工业经济和信息化, 2021(3):136-137,157.  
LIN W B, LAI Y B, YU H, et al. Causes and treatment measures of blind gun with industrial electronic detonator[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2021(3): 136-137,157.

[8] 张英豪,张泽楠. 数码电子雷管应用问题的探讨[J]. 火工品,2018(4):54-57.  
ZHANG Y H, ZHANG Z N. Discuss on the application of digital electronic detonator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2018(4):54-57.

[9] 李治国. 数码电子雷管装配生产线的实践[J]. 煤矿爆破, 2021,39(1): 35-38.  
LI Z G. Practice of digital electronic detonator assembly line[J]. Coal Mine Blasting, 2021,39(1): 35-38.

[10] 王伟,崔占忠,唐凯,等. 电子雷管高压交流载波扩频通信研究[J]. 北京理工大学学报,2012,32(11): 1169-1173.  
WANG W, CUI Z Z, TANG K, et al. Spread spectrum communication system of high-voltage AC carrier for electronic detonator network [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012,32(11): 1169-1173.