

文章编号: 1003-1480 (2022) 02-0016-04

工业电子雷管抗冲击性能试验研究

杨文^{1, 2}, 岳彩新², 宋家良², 吴志超², 孙晨²

(1.煤炭科学研究总院, 北京, 100013; 2.中煤科工集团淮北爆破技术研究院有限公司, 安徽 淮北, 235000)

摘要: 为了研究工业电子雷管在小断面爆破中拒爆的原因, 通过水下环境对起爆网络中的电子雷管进行不同强度的冲击波冲击试验。研究发现: 电子雷管受冲击作用会出现殉爆、损坏拒爆、暂时失效拒爆、正常发火4种情况; 暂时失效是由于芯片模块中电容出现冲击失电, 导致剩余电压低于药头发火电压而产生拒爆, 但模块内部组件没有被损坏, 可以重复起爆; 所研究的电子雷管损坏压力为123.66~181.57MPa, 暂时失效压力为100.29~123.66MPa, 电容开始失电压力为36.35~65.82MPa, 抗冲击波强度为100.29MPa。

关键词: 工业电子雷管; 抗冲击性能; 拒爆; 电容失电

中图分类号: TJ45⁺2.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.004

Experimental Research on the Impact Resistance of Industrial Electronic Detonators

YANG Wen^{1, 2}, YUE Cai-xin², SONG Jia-liang², WU Zhi-chao², SUN Chen²

(1. China Coal Research Institute, Beijing, 100013; 2. Huaibei Blasting Technology Research Institute Co. Ltd., CCTEC, Huaibei, 235000)

Abstract: In order to study the reasons for the misfire of industrial electronic detonators in small-section blasting, the electronic detonators in the detonation network were subjected to shock wave impact tests of different intensities through the underwater environment. The study found that the electronic detonators under shock wave impact will have four kinds of situations, including detonation of sympathy, damaged misfire, temporary misfire, and normal fire. Temporary misfire is due to the shock loss of the capacitor in the chip module, which result in the residual voltage lower than the ignition voltage and misfire, but the internal components of the module are not damaged and the explosion can be repeated. The damage pressure of the studied electronic detonator is between 123.66~181.57MPa, the temporary failure pressure is between 100.29~123.66 MPa, the capacitor's initial loss of voltage is between 36.35~65.82MPa, and the shock wave strength is 100.29MPa.

Key words: Industrial electronic detonator; Impact resistance; Misfire; Capacitor loss

工业电子雷管以其独特优势得到迅速发展, 从2016年的179万发增长至2020年的1.17亿发, 民爆行业也明确规划到2022年, 电子雷管逐步实现全面替代普通工业雷管。但由于电子雷管起爆系统操作较复杂、流程繁琐, 导致初期出现多种问题。尤其是电子雷管在工程应用中的拒爆现象, 严重阻碍其应用和

全面推广。电子雷管在普通露天大断面工程爆破中, 极少发生拒爆丢炮现象, 但是在隧道、井下及孔桩等小断面爆破工程中出现较多拒爆情况。其中比较困扰的问题是拒爆的电子雷管重新检测一切正常, 且再次激发能够正常发火。

国内学者通过大量研究, 将小断面电子雷管拒爆

收稿日期: 2021-09-30

作者简介: 杨文(1995-), 男, 硕士研究生, 从事爆炸安全技术研究。

的主要影响因素归结为两点：一是先爆炸孔炸药爆炸后产生的电子脉冲对芯片产生影响^[1-2]；二是由于小断面掘进爆破中孔距相对较近，后爆孔内的电子雷管受先爆炸孔所产生的冲击振动影响，造成雷管损坏失效^[3]。目前对于电子雷管拒爆后再次激发可以正常发火的原因分析较少，本研究通过对电子雷管及其同款电子芯片模块进行水下冲击拒爆试验，探究冲击强度与电子雷管受损程度的关系，分析其拒爆原因，为提升产品抗冲击性能提供依据。

1 试验

1.1 试验方案

将主发药包与电子雷管样品中心对齐，通过直径约1mm的铁丝拉直固定在钢制框架内，再将钢制框架放置于爆炸水池中，药包中心入水深度为1.2m^[4]。主发药包与试验样品采用同网起爆，设置其延期间隔为150ms，让先起爆的炸药包产生的冲击波，作用于网络中还没有达到设定爆炸延期时间的被测试验样品，即在水下模拟工程现场电子雷管起爆网络。通过改变样品与药包间距离控制样品受冲击强度。将同款电子芯片模块使用硅胶封装在发蓝壳中，以不渗水为准，采用相似布置方法，通过示波器测试芯片模块受冲击时输出起爆电压变化。将压力传感器与主发药包中心对齐，测试主发药包爆炸时不同距离处冲击波的强度。取出试验样品查验损伤情况，试验装置如图1。

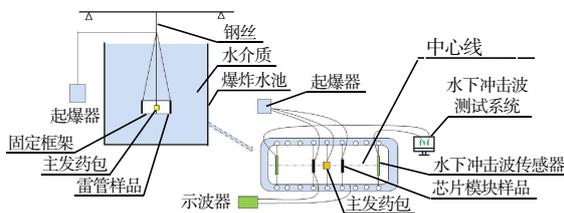


图1 水下爆炸测试系统

Fig.1 Underwater explosion test system

1.2 主要试验仪器与材料

电子雷管及芯片模块样品为国内某民爆企业提供，其电子芯片模块使用电解铝电容，容量100 μF，额定电压25V，充电电压22.5V；水下爆炸压力测试采用ICP电气石传感器和BLAST-PRO冲击波测试系

统；芯片模块电压信号测量采用泰克MDO 3034的示波器；主发药包由15g、Φ25mm×27mm的岩石乳化炸药药卷和1发起爆电子雷管组成；爆炸水池为Φ1.8m×1.8m、壁厚30mm的高强度不锈钢水箱。

2 试验结果与分析

2.1 冲击波峰值与测点距离关系

炸药在水中爆炸产生的冲击波在传播过程中，随着距离增加呈指数形式衰减，其峰值压力计算公式在近场和中远场中不相同，以传感器到药包中心的距离 R 与装药半径 R_0 的比距离 $R/R_0=6$ 作为分界点^[5]。本次受测样品受冲击波冲击作用属于中远场，在中远场范围内根据Cole经验公式^[6]，球形装药水下爆炸冲击波峰值压力计算如下：

$$P_m = k \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式(1)中： P_m 为冲击波压力峰值，MPa； Q 为标定药包的重量，kg； R 为传感器至药包中心的距离，m； k 、 α 为与实验有关系数和指数。

为了防止冲击波超压及雷管爆炸碎片对ICP电气石传感器的损坏，测试了10g、15g球形装药的乳化炸药在40cm以上产生的冲击波峰值压力，试验数据如表1所示。以对数 $\ln(P_m)$ 为 y 值、 $\ln(Q^{1/3}/R)$ 为 x 值，采用最小二乘法对数据进行曲线拟合，得到 $\alpha=1.464$ ， $k=48.429$ ，即本试验中主发药包爆炸在中远场产生的峰值压力计算公式为：

$$P_m = 48.429 \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{1.464} \quad (2)$$

表1 不同测点距离冲击波峰值压力测试数据
Tab.1 Shock wave peak pressure test data at different measuring point distances

L/m	药量/g	实测峰值压力 P_m /MPa		压力平均值 /MPa	x 值	y 值
		第1次	第2次			
0.4	10	19.238	19.523	19.381	-0.618 8	2.964 5
0.5	10	12.193	11.711	11.952	-0.841 9	2.480 9
0.6	10	10.204	10.228	10.216	-1.024 2	2.324 0
0.7	10	9.039	9.786	9.412	-1.178 3	2.242 0
0.4	15	23.309	24.628	23.969	-0.483 5	3.176 7
0.5	15	20.094	19.635	19.865	-0.706 8	2.989 0

2.2 电子雷管冲击试验结果

试验测得距主发药包不同距离被测试样冲击结果，见表2。使用电子雷管专用起爆器对拒爆雷管进行损伤部位检测，若检测正常对其再次激发测试其是

否正常发火。若拒爆雷管检测正常再次激发不能发火说明雷管的点火药头发生损坏。不同距离拒爆雷管损坏部位见表3。

表2 电子雷管冲击结果
Tab.2 Electronic detonator impact results

L/m	发数	殉爆 /发	拒爆(损坏) /发	拒爆(再次激发 可以发火)/发	正常发火 /发	峰值压力 P _m /MPa
0.03	10	10	0	0	0	-
0.05	10	1	9	0	0	-
0.08	10	0	10	0	0	251.72
0.10	10	0	2	8	0	181.57
0.13	10	0	0	2	8	123.66
0.15	10	0	0	0	10	100.29

表3 电子雷管冲击损坏部位
Tab.3 Electronic detonator impact damaged parts

L/m	发数	拒爆(损坏) /发	集成电路 损坏/个	电容断开 /个	电流异常 /个	药头损坏 /个
0.05	10	9	9	0	0	0
0.08	10	10	3	5	2	0
0.10	10	2	0	0	0	2
0.13	10	0	0	0	0	0

2.3 冲击试验结果分析

由表2可知,冲击波作用后的被测电子雷管的情况分为殉爆、损坏拒爆、暂时失效拒爆(再次激发正常发火)、正常发火。其中电子雷管拒爆分为2种情况:第1种为损坏拒爆,由表3可知,其损坏部位主要有芯片模块中电容断开、集成电路损坏及短路、点火药头损坏等不可逆转的硬件损坏,这种损坏发生在0.05~0.10m之间,损坏程度随着距离的减小而加大,开始出现损坏拒爆距离在0.10~0.13m之间。冲击波压力峰值在123.66~181.57MPa之间;第2种为暂时失效拒爆(再次激发正常发火),表现特征为雷管受冲击发生了拒爆情况,使用专用起爆器对拒爆雷管检测显示一切正常,没有出现损坏,再次激发亦可正常起爆,所以在表3中L=0.13m处,雷管出现拒爆但没有损坏现象,此现象与普通雷管拒爆具有本质区别^[7],也是本文的主要研究内容。这种情况发生在0.10~0.15m之间,开始出现在0.13~0.15m之间,冲击波压力峰值在100.29~123.66MPa之间。

电子芯片模块受冲击其内部电压波形如图2所示。

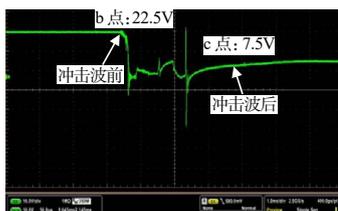


图2 芯片模块电压曲线
Fig.2 Chip module voltage curve

由图2可见充电电压为22.5V,受冲击作用后出

现失电现象,冲击后检测芯片模块正常,亦没有损坏。不同距离芯片模块失电结果见表4。采用升降法测出此型雷管点火药头在所使用的电容放电情况下99.99%发火电压为13.2V,不发火电压为11.3V。结合表2、表4可知,超前冲击波在不造成雷管任何物理损伤的情况下,也可造成电子雷管电气系统出现“失电”现象,既降低芯片模块的起爆电压,使其无法达到雷管的发火电压。在L=10cm处,芯片模块冲击后剩余电压约7.5V,低于药头的不发火电压11.3V,所以雷管出现暂时失效拒爆;在L=15cm处,芯片模块冲击后剩余电压约18.8V,高于药头的发火电压13.2V,雷管可以正常发火。芯片模块开始失电发生在0.20~0.30m之间,冲击波压力峰值在36.35~65.82MPa之间。

表4 不同距离芯片模块失电压

Tab.4 Voltage loss of sample chip module at different distances

L/m	0.08	0.10	0.15	0.20	0.30
失电压/V	22.5	15.0	4.0	2.0	0
剩余电压/V	0	7.5	18.8	20.5	22.5
峰值压力p _m /MPa	251.72	181.57	100.29	65.82	36.35

2.4 冲击波对芯片模块的作用

前述试验表明:超前冲击波对电子雷管的作用,除硬件损伤外,还会导致电子芯片模块“失电”,从而使电子雷管发火电压低于其99.99%发火电压而产生拒爆。为了厘清冲击波导致芯片模块“失电”的具体原因,首先,将电容从芯片模块引出,使其与集成电路分开,单独接受冲击波作用,并测试其电路电压波形变化;其次,将同款电容充电后接受冲击波作用,测试其电压波形变化。试验装置如图3所示,图3中被测芯片样品、主发药包、电压信号测试系统组成与图1中一致。被测芯片和电容样品的电压波形以及冲击波作用后电容的X光扫描图分别见图4~5。

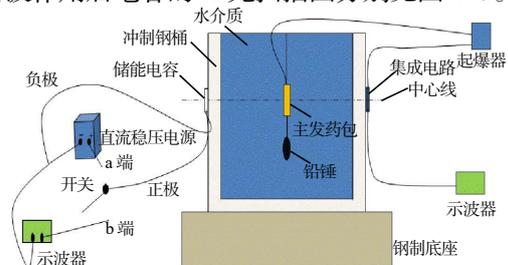


图3 芯片模块不同部位冲击装置

Fig.3 Impact devices at different parts of the chip module

图4试验结果表明:将电容从芯片模块引出后,芯片电路单独受到冲击波作用,在不损坏电路的情况

下,示波器波形显示为一条直线,表明芯片模块的电压没有发生“失电”情况。而与芯片同时接受冲击波作用的电容,则发生了“失电”情况,电压由 22.5V 降到 8.5V,由图 5 可见,被冲击后的电容的物理结构没有损坏或变化,所以电容发生“失电”的原因可能是电容受到冲击波作用时,其内部结构出现瞬间的应力集中现象,产生弹性振动导致电荷提前泄漏,冲击过后内部结构可以自行恢复,所以失电后再检测表现正常。



图 4 电容和集成电路受冲击电压波形

Fig. 4 Impulse voltage waveforms of capacitors and integrated circuits

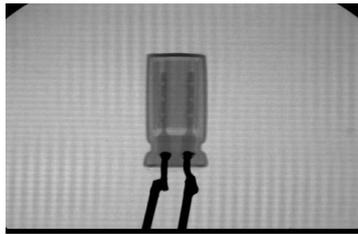


图 5 冲击后电容 X 光检测图

Fig.5 X-ray detection diagram of capacitance after impact

由此可知,一定范围内,超前冲击波作用使得电子雷管芯片电容的电压降低,是造成“起爆网络拒爆雷管还可以再次正常起爆”现象的原因。

3 结论

(1) 电子雷管受冲击波冲击作用会出现殉爆、

损坏拒爆、暂时失效拒爆、正常发火 4 种情况,本研究的电子雷管随着冲击波强度增加依次出现以上情况。

(2) 暂时失效拒爆是由于芯片模块中电容发生冲击失电,导致剩余电压低于药头发火电压,从而产生拒爆,但模块内部组件没有被冲击损坏,再次激发可正常发火。

(3) 此型电子雷管出现损坏拒爆压力在 123.66 ~ 181.57MPa 之间;暂时失效拒爆压力在 100.29 ~ 123.66MPa 之间;芯片模块开始失电压力在 36.35 ~ 65.82MPa 之间;抗冲击波强度为 100.29MPa。

参考文献:

- [1] 王长利,刘晓新,李迅,等.炸药在封闭空间爆炸过程的电磁辐射实验研究[R].中国核科学技术进展报告(第三卷),2013.
- [2] 王铭锋,周军.关于电磁脉冲对电子雷管推广应用影响问题的探讨[J].煤矿爆破,2019,37(5):25-27.
- [3] 刘忠民,杨年华,石磊,等.电子雷管小孔距爆破拒爆试验研究[J].爆破器材,2021,50(5):39-42.
- [4] 龚悦,汪旭光,何杰,等.玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸能量的影响研究[J].中国科学技术大学学报,2017,47(5):443-447.
- [5] 宫翔飞,刘文韬,等.水下爆炸近场峰值压力的数值模拟[J].爆炸与冲击,2019,39(4):1-8.
- [6] COLE R H. Underwater explosions [M].New Jersey: Princeton University Press, 1948.
- [7] 王尹军,颜事留,李玉景,等.延期雷管的殉爆和抗冲击波性能[J].工程爆破,2008(3):67-69.