

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.02.002

电子雷管用电子控制模块的抗冲击性能研究*

杨文^① 韩尧^② 吴竞^① 崔珍珍^① 黄孟文^① 宋家良^① 陈以钻^③

①中煤科工集团淮北爆破技术研究院有限公司(安徽淮北,235000)

②中国兵器工业标准化研究所(北京,100089)

③广西金建华民用爆破器材有限公司(广西百色,533000)

[摘要] 针对小断面爆破时电子雷管内电子控制模块易受冲击作用失效的问题,通过钢桶冲击实验,对工作状态的电子控制模块及其核心部件分别进行抗冲击性能研究。结果表明,电子控制模块受冲击作用后,相比于物理结构损坏,易出现内部储能电容失电现象。电子雷管用储能电容受冲击失电是固有特性。储能电容受冲击失电性能由强到弱的顺序为:固态铝电解电容、电解铝电容、固态钽电容。储能电容受冲击失电量与电容类型、受冲击强度以及管壳内部防护结构的设计相关。设计的钢桶冲击实验方案能定性研究电子控制模块及内部元器件的抗冲击性能,可用于生产实践中对雷管结构设计和元器件进行筛选,从根本上控制产品质量。

[关键词] 电子雷管;电子控制模块;储能电容;抗冲击性能;冲击失电

[分类号] TJ45+2.3; TQ560.7; TD235.2+2

Impact Resistance of Electronic Control Module for Electronic Detonators

YANG Wen^①, HAN Yao^②, WU Jing^①, CUI Zhenzhen^①, HUANG Mengwen^①, SONG Jialiang^①, CHEN Yizuan^③

① Huaibei Blasting Technology Research Institute Co., Ltd., CCTEC (Anhui Huaibei, 235000)

② China Ordnance Industrial Standardization Research Institute (Beijing, 100089)

③ Guangxi Jinjianhua Industrial Explosive Materials Co., Ltd. (Guangxi Baise, 533000)

[ABSTRACT] Aiming at the failure of the electronic control module used for electronic detonators under the impact action during small-section blasting, impact resistance of the electronic control module and its core components in working state were studied through impact test of steel barrel. Results show that compared with the damage of physical structure, the electronic control module is more likely to lose power of the internal energy storage capacitor when it is affected by impact. Impact power loss of the energy storage capacitor used for electronic detonators is its inherent characteristic. The order of power loss of energy storage capacitor under impact from large to small is solid aluminum electrolytic capacitor, electrolytic aluminum capacitor and solid tantalum capacitor. The impact loss of capacitor is related to capacitor type, impact strength and the design of internal protective structure of shell. The designed steel barrel impact test can qualitatively study the impact resistance of electronic control module and internal components. It can be used in the design of detonator structure and the screening of components in production practice, and fundamentally control product quality.

[KEYWORDS] electronic detonator; electronic control module; energy storage capacitor; impact resistance; impact loss of power

0 引言

作为我国民用起爆器材更新换代产品,工业电子雷管(简称电子雷管)采用电子控制模块取代传统延期雷管的化学延期体进行延期,具有延期精度

高、延期时间可任意设置等优点。电子雷管主要由民爆产品生产企业和电子设计企业共同研发。当前,国内研发、生产、销售电子控制模块的企业有二三十家,不同电子设计企业的内部集成电路设计、元器件选择、产品性能指标不统一,产品质量差异明显,尚缺少相关性能的评价指标和检测方法。

* 收稿日期:2022-04-19

基金项目:2022年重庆研究院自立重点项目(2022ZDXM15)

第一作者:杨文(1995-),男,硕士,主要从事爆炸安全技术方面的研究。E-mail:2821614763@qq.com

目前,电子雷管相关的研究工作主要集中在工程应用^[1-4],关于性能方面的研究相对缺乏。杨文等^[5]对电子雷管的抗静电性能进行了研究,发现电子雷管抗静电发火能力较强,但电子控制模块受静电作用后易损坏失效。吴国群^[6]研究了环境温度对电子雷管延期性能的影响,结果显示,低温对电子雷管延期精度的影响较大。刘忠民等^[7]通过现场模拟实验发现,电子雷管产品抗冲击性能较差,易发生结构损坏,导致拒爆。岳彩新等^[8]实验发现,高频振动对电子雷管的延期时间有延长作用。针对电子雷管在小断面爆破工程中出现的拒爆、丢炮现象,前期通过对电子雷管抗冲击性能的研究发现,不同种类电子雷管抗冲击拒爆强度及拒爆原因差异明显^[9]。部分电子雷管受冲击作用,易出现内部储能电容失电现象,导致剩余能量无法点燃引火药头,产生暂时失效拒爆^[10]。

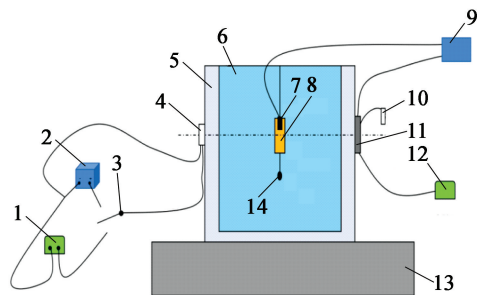
由于上述研究中电子控制模块种类较少,本文中,设计了钢桶冲击实验方案,进一步对多种电子控制模块产品及内部主要组件进行冲击,重点研究了不同类型储能电容及防护结构对电子控制模块抗冲击性能的影响。对生产实践中电子控制模块内部结构设计、关键元器件的选择提供技术支持,从而从根本上控制产品质量。

1 实验部分

1.1 实验方案

电子控制模块(被测样品)主要由储能电容、集成电路、电路板以及外层橡胶套组成,本身防水性能较差。设计的钢桶冲击实验方案可避免电子元件直接与水接触从而出现短路、损坏、失电的现象,简化了操作流程,降低了冲击波对被测样品的直接损坏。实验可重复进行。

实验装置如图1。冲制钢桶水平放置于钢制底座,内部装满水介质,中心位置吊放主发药包,被测样品通过绝缘胶带均匀紧贴外壁四周;药包中心与样品中心对齐,垂直入水100 mm。采用直流稳压电源对储能电容进行充电,使电容处于带电工作状态;电子控制模块和集成电路与起爆网络并联,与起爆雷管延期时间设置为100 ms。药包先爆炸产生冲击波,通过水介质瞬间传递到钢桶壁,对钢桶壁外侧处于工作状态的被测样品产生冲击作用。改变药包药量,可控制被测样品的受冲击强度。利用示波器测量被测样品受冲击瞬间内部发火电压的变化。使用专门起爆器对冲击后样品进行损伤检测。



1 - 示波器;2 - 直流稳压电源;3 - 开关;4 - 储能电容;
5 - 冲制钢桶;6 - 水介质;7 - 起爆雷管;8 - 主发药包;
9 - 起爆器;10 - 储能电容;11 - 电子控制模块;12 - 示波器;
13 - 钢制底座;14 - 铅锤。

图1 钢桶冲击装置

Fig. 1 Steel drum impact device

1.2 实验材料及设备

两款典型电子控制模块样品为5533#、8033#。电容样品,某电子设计企业提供。集成电路样品,通过外径1.5 mm、内径1.0 mm的绝缘铜芯线将储能电容引出电子控制模块制成。实验时,电容悬空远离桶壁,可忽略冲击波的作用,如图1所示。主发药包由抗水乳化炸药与1发起爆电子雷管通过防水牛皮纸卷制而成。冲制钢桶采用标准液化石油气钢瓶分切而成,内径314 mm、全高320 mm、壁厚3 mm。示波器为泰克MDO3034。直流稳压电源精度为0.01 V。

2 结果与分析

2.1 电子控制模块受冲击结果

对两款电子控制模块样品进行不同强度的冲击,出现不同程度的失电现象,结果见表1。每种冲击强度测试2发,取平均值。样品充电电压为22.5 V;受冲击电压降低量称为失电压;失去能量占充电能量的比例称为失电比。电子控制模块储存能量

$$Q = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

式中: C 为电容; U 为电容电压。

电子控制模块受冲击后性能检测均正常,未出现物理结构损坏现象。对比两款样品失电压与冲击强度的关系,如图2所示。

两个样品所使用的储能电容是同款电解铝电容,主要区别在于内部集成电路的设计。由图2知,两个样品冲击失电趋势相似。由此可知,在电子控制模块未被冲击损坏的情况下,仅改变内部集成电路的设计,并不能显著提高电子模块的抗冲击失电

表 1 电子控制模块受冲击的失电压参数

Tab. 1 Voltage loss parameters of electronic control module under impact

药量/g	模块型号	平均失电压/V	剩余电压/V	失电比/%
5	8033 [#]	1.6	20.9	13.72
	5533 [#]	1.7	20.8	14.54
10	8033 [#]	4.6	17.9	36.71
	5533 [#]	6.7	15.8	50.69
15	8033 [#]	9.0	13.5	64.00
	5533 [#]	9.5	13.0	66.62
20	8033 [#]	15.8	6.7	91.13
	5533 [#]	13.8	8.7	85.05

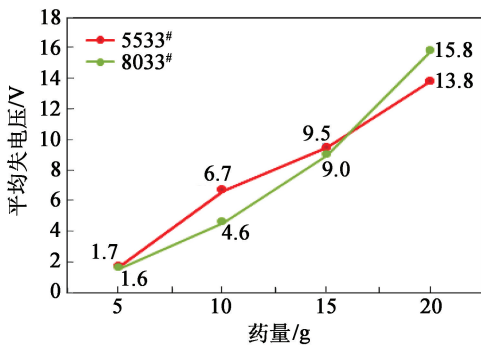


图 2 5533[#]模块与 8033[#]模块受冲击的失电压对比

Fig. 2 Comparison of voltage loss between Module 5533[#] and Module 8033[#] under impact

性能。

2.2 电子控制模块内部元件受冲击结果

为了进一步研究电子控制模块的失电原因,对 5533[#]模块中的集成电路与储能电容(电解铝电容)分别进行冲击,储能电容与电子控制模块的充电电压一致(22.5 V)。失电波形如图 3 所示;失电压参数见表 2。

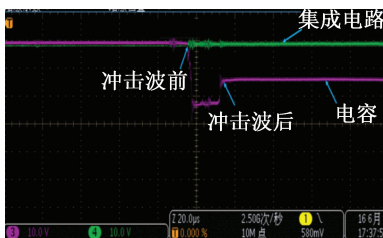


图 3 电容和集成电路受冲击的电压波形

Fig. 3 Impulse voltage waveforms of the capacitor and the integrated circuit

冲击后,储能电容和集成电路检测正常,可以重复使用,与上文结果相符。由图 3 知:引出电容后的电子控制模块(集成电路样品)受冲击瞬间发火电

表 2 5533[#]模块不同部位受冲击的失电压参数

Tab. 2 Voltage loss parameters of different parts of Module 5533[#] under impact

药量/g	部位	平均失电压/V	剩余电压/V	失电比/%
5	储能电容	2.8	19.7	23.34
	集成电路	0	22.5	0
10	储能电容	6.2	16.3	47.52
	集成电路	0	22.5	0
15	储能电容	9.9	12.6	68.64
	集成电路	0	22.5	0
20	储能电容	12.5	10.0	80.25
	集成电路	0	22.5	0

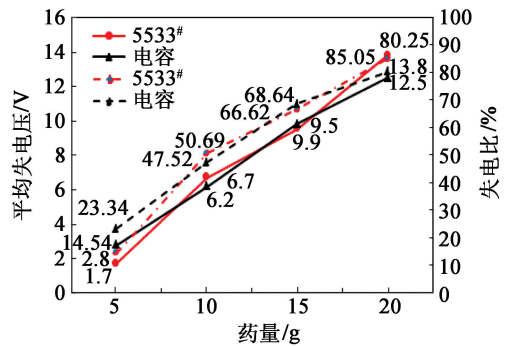


图 4 电容与 5533[#]模块失电对比

Fig. 4 Comparison of power loss between capacitor and Module 5533[#]

压保持水平,未有失电现象出现;与此同时,储能电容却出现明显失电现象。

储能电容失电与表 1 中 5533[#]模块失电对比见图 4。图 4 中:实线为平均失电压对比;虚线为失电比对比。由图 4 发现,在同样强度的冲击下,储能电容与 5533[#]模块的平均失电压和失电比的结果基本一致。至此,可以确定,电子控制模块受冲击失电是电容失电所致,集成电路受冲击作用不会导致失电现象出现。

2.3 电子雷管用储能电容受冲击结果

目前,电子控制模块中内部集成电路设计属于企业秘密,不同电子设计企业有所差异。但电子控制模块中使用的储能电容主要有 3 种类型,分别是电解铝电容、固态铝电解电容以及固态钽电容。进一步研究储能电容冲击失电是否是固有特性。由于制作工艺的差别,不同类型储能电容的单位体积电容差异明显。选取尺寸相近、满足管壳尺寸要求(直径小于 7 mm)的 3 种储能电容进行抗冲击实验。在充电电压 25 V、药包药量 15 g 的冲击下,实

验结果如表3所示。

由表3知,在同样强度的冲击下,3种类型的储能电容都出现了明显的失电现象。固态铝电解电容失电压和失电比最小,剩余能量最多,抗冲击失电性能较强。电解铝电容的失电压为13.2 V,失电比为77.72%,均高于固态钽电容的8.6 V和56.97%;但因电解铝电容的额定电容较大,剩余能量6.97 mJ仍大于固态钽电容的6.32 mJ,更易点燃引火药头。

由于表3中电解铝电容样品未加橡胶套,在同等级强度的冲击下,表3中的失电比高于表2。

由上述实验结果知,储能电容受冲击失电是固有特性,但不同类型储能电容抗冲击失电性能差异明显;电容抗冲击失电性能由强到弱的顺序为:固态铝电解电容、电解铝电容、固态钽电容。在引火药头所需发火能量固定的情况下,可选择抗冲击失电性能强的储能电容,从而降低电子雷管发生暂时失效拒爆的概率。

电解铝电容以制造工艺简单、单位体积电容大及价格低廉等优势得到广大电子雷管芯片设计企业的青睐。本文中,选取两款额定电容为100 μF 、额定电压为25 V的电解铝电容(记a、b),模拟研究管壳中电容的不同防护结构对抗冲击失电性能的影响。管壳为钢制发蓝壳,内径5.7 mm,外径6.2 mm,长度56.9 mm。当电容直径 D 小于管壳内径 d 时,存在不耦合系数 K , $K = d/D$ 。在充电电压为22.5 V、药包药量为15 g的冲击下,两个电容的失

电测试结果见表4。

由表4知,储能电容采取不同防护结构,抗冲击失电性能差异明显。a电容、b电容与管壳间不耦合系数分别为1.1、1.4,相比于无防护,失电比分别下降了27.26%、41.19%。不耦合系数越大(电容尺寸越小),电容受冲击失电比越小,管壳防护效果越好。b电容分别采用橡胶套、管壳、橡胶套加管壳3种防护措施,相比于无防护,电容失电比分别下降了15.36%、41.09%、20.00%,直接加管壳的效果好于其他两种方式。

主要原因是,爆炸冲击波透过管壳,在两种介质的界面处发生反射与透射,造成冲击波衰减;相比于橡胶固体介质,空气介质中冲击波能量衰减速率更快,作用于电容的冲击压力较小,电容失电量降低。在实际应用中,当管壳直径、电容类型和性能不变时,减小电容尺寸,增加电容与管壳间的不耦合系数,在空隙部位填充冲击波衰减率大的防护材料,可提高电容的抗冲击失电性能。

3 结论

1) 电子控制模块受冲击作用,相比于物理结构损坏,易发生失电现象;储能电容受冲击失电是模块失电致因。

2) 电子雷管用储能电容受冲击失电是固有特性。本文中,储能电容抗冲击失电性能由强到弱的

表3 3种储能电容受冲击的失电量

Tab.3 Impact power loss of three types of capacitors

类型	尺寸/ (mm × mm)	额定电容/ μF	额定电压/ V	失电压/ V	剩余电压/ V	失电比/ %	剩余能量/ mJ
电解铝电容	$\varnothing 4.2 \times 11.3$	100	25	13.2	11.8	77.72	6.97
固态铝电解电容	$\varnothing 3.7 \times 10.8$	68	25	7.8	17.2	52.67	10.05
固态钽电容	$7.3 \times 4.3 \times 4.2$ (mm × mm × mm)	47	35	8.6	16.4	56.97	6.32

表4 不同防护措施下储能电容的失电压参数

Tab.4 Voltage loss parameters of capacitor under different protective measures

电容	尺寸/(mm × mm)	防护措施	不耦合系数	失电压/V	失电比/%
a	$\varnothing 5.2 \times 12.5$	无		14.0	85.73
		管壳	1.1	8.0	58.47
		无		13.5	84.00
b	$\varnothing 4.2 \times 11.3$	橡胶套		9.9	68.64
		管壳	1.4	5.5	42.91
		橡胶套 + 管壳	1.0	9.0	64.00

顺序为:固态铝电解电容、电解铝电容、固态钽电容。电容受冲击失电量与电容类型、受冲击强度以及管壳内部防护结构设计相关。

3)设计的钢桶冲击实验方法可以定性研究电子控制模块及内部元器件的抗冲击性能,生产实践中可用于对雷管结构设计和元器件进行筛选,从根本上控制产品质量。

参 考 文 献

- [1] 孙冰, 宋良灵, 曾晟, 等. 电子雷管和导爆管雷管起爆的振动信号时频特征[J]. 爆破器材, 2022, 51(1): 47-52.
SUN B, SONG L L, ZENG C, et al. Comparison of time-frequency characteristics of vibration signals detonated by electronic detonators and nonel detonators [J]. Explosive Materials, 2022, 51(1): 47-52.
- [2] 刘文胜, 陈能革, 朱末琳, 等. 数码雷管高精度延时对爆破振动影响试验研究[J]. 金属矿山, 2021(9): 37-43.
LIU W S, CHEN N G, ZHU M L, et al. Test study on the effect of digital detonator high precision delay time on blasting vibration [J]. Metal Mine, 2021(9): 37-43.
- [3] 吕淑然, 姚浩辉, 王立强. 电子数码雷管在铁矿采场爆破中的应用研究[J]. 工程爆破, 2013, 19(3): 53-56.
LÜ S R, YAO H H, WANG L Q. The study and application of blasting with digital electronic detonator in iron ore stope [J]. Engineering Blasting, 2013, 19(3): 53-56.
- [4] 周慈亮, 汤有富, 郑琪, 等. 某型电子雷管在隧道控制爆破中的应用[J]. 爆破器材, 2021, 50(3): 51-54.
ZHOU C L, TANG Y F, ZHENG Q, et al. Application of an electronic detonator in tunnel controlled blasting [J]. Explosive Materials, 2021, 50(3): 51-54.
- [5] 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 antistatic performance of digital electronic detonator [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(1): 9-11.
- [6] 吴国群. 环境温度对数码电子雷管延期时间的影响研究[J]. 煤矿爆破, 2020, 38(1): 26-28.
WU G Q. Research on the influence of ambient temperature on the delay time of digital electronic detonator [J]. Coal Mine Blasting, 2020, 38(1): 26-28.
- [7] 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.
LIU Z M, YANG N H, SHI L, et al. Experimental study on misfire in small hole-space blasting of electronic detonator [J]. Explosive Materials, 2021, 50(5): 39-42.
- [8] 岳彩新, 秦婷, 高玉刚, 等. 高频振动对工业数码电子雷管延期时间的影响[J]. 煤矿爆破, 2019, 37(4): 8-12.
YUE C X, QIN T, GAO Y G, et al. Influence of delay time of high frequency vibration on industrial digital electronic detonator [J]. Coal Mine Blasting, 2019, 37(4): 8-12.
- [9] 杨文, 吴竞, 宋家良, 等. 两种电子雷管抗冲击性能对比试验研究[J]. 爆破器材, 2022, 51(5): 38-42.
YANG W, WU J, SONG J L, et al. Comparative experimental study on impact resistance of two kinds of electronic detonators [J]. Explosive Materials, 2022, 51(5): 38-42.
- [10] 杨文, 岳彩新, 宋家良, 等. 工业电子雷管抗冲击性能试验研究[J]. 火工品, 2022(2): 16-19.
YANG W, YUE C X, SONG J L, et al. Experimental research on the impact resistance of industrial electronic detonators [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(2): 16-19.