

高压物理学报

延期状态下电子雷管电子控制模块的高过载加载实验

叶紫阳 吴红波 杨仕春 黄策树 李天浩 孙翼 马成帅 任梦雨

Experimental Study on High Overload Loading of Electronic Control Module inside Electronic Detonator under Delayed State

YE Ziyang, WU Hongbo, YANG Shichun, HUANG Guoshu, LI Tianhao, SUN Yi, MA Chengshuai, REN Mengyu

引用本文:

叶紫阳, 吴红波, 杨仕春, 等. 延期状态下电子雷管电子控制模块的高过载加载实验[J]. 高压物理学报, 2025, 39(1):014102.

DOI: 10.11858/gywlxb.20240840

YE Ziyang, WU Hongbo, YANG Shichun, et al. Experimental Study on High Overload Loading of Electronic Control Module inside Electronic Detonator under Delayed State[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(1):014102. DOI: 10.11858/gywlxb.20240840

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240840>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

压剪载荷作用下TB6钛合金的动态力学性能

Dynamic Behavior of TB6 Titanium Alloy under Shear-Compression Loading

高压物理学报. 2019, 33(2): 024206 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190713>

冲击载荷作用下PZT-5压电陶瓷的力电特性

Dynamic Behavior of PZT-5 Piezoelectric Ceramics under Impact Loading

高压物理学报. 2019, 33(5): 054204 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180708>

花岗岩粗糙表面动摩擦形态演化

Rough Surface Morphology of Granite Subjected to Dynamic Friction

高压物理学报. 2021, 35(3): 031201 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200640>

铝粒径及成型压强对Al/PTFE冲击反应的影响

Influence of Particle Size of Aluminum Powder and Molding Pressure on Impact-Initiation of Al/PTFE

高压物理学报. 2019, 33(5): 054203 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190712>

电爆炸金属桥箔早期过程中电磁-热-力多物理场耦合建模与分析

Electric Explosion Early Process Analysis of Metal Bridge Foil Based on an Electromagnetic-Thermal-Mechanical Model

高压物理学报. 2024, 38(1): 012301 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230711>

爆轰加载下TATB基钝感炸药的冲击-卸载-再冲击实验装置设计与模拟

Design and Simulation of Shock-Release-Reshock Experimental Device for TATB-Based Insensitive Explosives under Detonation Loading

高压物理学报. 2024, 38(4): 044102 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230826>

延期状态下电子雷管电子控制模块的高过载加载实验

叶紫阳¹, 吴红波¹, 杨仕春², 黄菓树¹, 李天浩¹, 孙翼³, 马成帅⁴, 任梦雨¹

1. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001;
2. 安徽江南化工股份有限公司, 安徽 合肥 230031;
3. 无锡盛景微电子股份有限公司, 江苏 无锡 214000;
4. 安徽中金立华矿业工程有限公司, 安徽 安庆 246003)

摘要: 为探究电子雷管内的电子控制模块在延期状态下受冲击载荷时的失效机制, 采用分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 对电子雷管试件进行了高过载加载测试, 得到了整体电子控制模块和分离出钽电容的其余电子控制模块受不同加载压力时的失效情况。结果显示: 钽电容在 $1.495 \times 10^5 \text{g}$ 过载时出现电压下降现象, 且过载越大, 短路失效情况越明显; 在一定过载范围内, 钽电容因其特有的自愈性, 可在短时间内回到起始量级; 当过载超过临界范围, 达到 $3.848 \times 10^5 \text{g}$ 时, 钽电容损坏且无法逆转。模块内其余组件的抗过载能力强于电容, 芯片在 $4.155 \times 10^5 \text{g}$ 过载后检测异常, 电阻元件失效发生在 $4.249 \times 10^5 \text{g}$ 以上过载。

关键词: 电子雷管; 电子控制模块; 分离式霍普金森压杆; 高过载; 失效

中图分类号: O521.9; O347; TQ565.2

文献标志码: A

近年来, 随着微电子火工品的大力推广, 电子雷管在爆破作业中的使用量逐年增加^[1-3]。与其他工业雷管相比, 电子雷管的延期时间精准且可调, 起爆网络设计简单, 安全隐患相对较少^[4-5], 这些优点都得益于其内部采用微型电子芯片取代了延期药和电引火元件^[6-7]。但是, 电子雷管在冲击载荷作用下经常失效拒爆, 且主要存在于小断面等炮孔间距近的爆破环境中。当受到爆炸冲击波影响时, 电子雷管内的电子控制模块受损失效, 导致电路无法正常传递信号和电量, 从而发生拒爆现象^[8-10]。

迄今为止, 国内外学者针对电子雷管受冲击失效拒爆问题已开展了大量研究。Ren 等^[11]采用分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 对电子雷管试样进行了加载测试, 得到了桥丝、电子控制模块及脚线铆接点受不同程度过载时的失效情况。杨文等^[12-13]开展了电子雷管水下爆炸冲击试验, 发现雷管拒爆是由于内部电子控制模块中电容受冲击失电导致剩余电量无法引燃药头所致。李长龙等^[14]利用马歇尔落锤对钽电容进行了高过载测试, 得到了钽电容在冲击载荷下短路失效时发生漏电流变化的机制。Teverovsky^[15]研究了机械应力对片式固体钽电容的影响, 首次证明了钽电容内的漏电流会随应力出现可逆变化, 且该变化高达 2 个数量级。王家乐等^[16]利用扫描电镜观察受水下爆炸冲击的钽电容, 发现其失效机理与内部氧化膜瑕疵有关。

在冲击载荷作用下, 可靠的电子控制模块是决定电子雷管发火稳定性的关键。虽然已有不少研究对电子雷管的失效问题进行了阐述, 但有关冲击载荷对电子雷管失效问题的研究主要集中在电容上, 而对带有雷管壳的电子控制模块及其内部核心组件芯片的冲击失稳研究不够深入。如今, SHPB 实验

* 收稿日期: 2024-07-02; 修回日期: 2024-07-26

基金项目: 安徽高校自然科学研究重点项目 (KJ2019A0121)

作者简介: 叶紫阳 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事电子雷管研究. E-mail: 2210779323@qq.com

通信作者: 吴红波 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事爆破器材与安全研究. E-mail: hbwu@aust.edu.cn

方法被广泛应用于测试和评判火工品在冲击载荷作用下的发火可靠性,其可行性也已经得到了验证^[17-19]。本研究利用 SHPB 对处于延期状态下的整体电子控制模块和分离出钽电容的其余电子控制模块进行加载测试,观察电容电压和桥丝的变化;对比试件在未受加载时从延期开始到起爆结束的情况,并对试件在非延期状态下(雷管不接入起爆网络)进行相同强度的加载测试,排除可能因加载而引起的试件内桥丝或电子控制模块的损伤,综合分析高过载条件下电子雷管电子控制模块的失效模式。

1 实验

1.1 实验装置

实验所采用的 SHPB 系统由秦皇岛龙科测控技术有限公司制造,搭配 CS-1D 型动态电阻应变仪和惠斯通电桥(秦皇岛信恒电子科技有限公司生产)、灵敏系数为 2.0 的应变片(益阳市广测电子有限公司生产)和 HDO4034A 示波器(TELEDYNE LECROY 公司生产)组成高过载测试系统,如图 1 所示。其中电子雷管电子引火元件及电子雷管起爆器统一由我国某电子控制模块生产厂家提供。

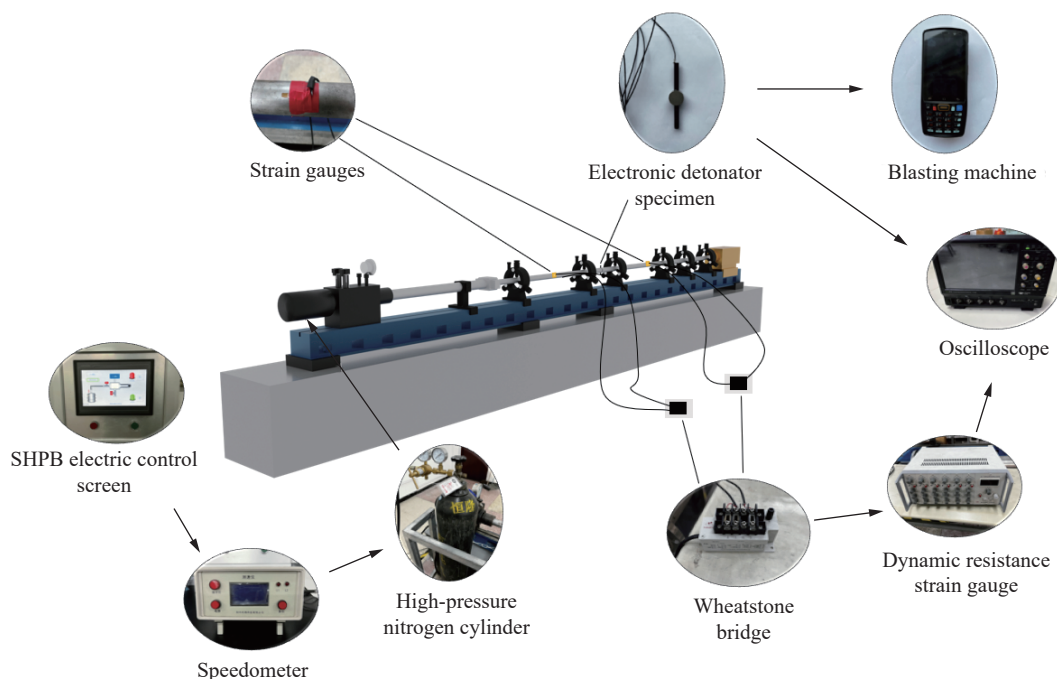


图 1 高过载测试系统

Fig. 1 Test equipment for high overload

1.2 SHPB 高过载实验原理

本研究采用 SHPB 对未装主发药和点火药头的数码电子雷管试件进行高过载测试。发射装置内的子弹在高气压的作用下带动撞击杆向右运动,当接触到入射杆左端面时,撞击使得压杆内部产生应力波,应力波继续向右传播至数码电子雷管试件,对试件进行一次高过载加载。随后应力波依次在透射杆、吸收杆内传播,最后作用于缓冲器,至此,一次加载实验结束。

应力波在细长杆中传播时,可忽略波的衰减和弥散效应,因此,将压杆中的应力波视为一维波^[20-22]。由于试件的大小和质量与压杆相比小得多,因此,忽略波在压杆与试件接触面的界面效应和损耗。而压杆对试件的高过载加载发生在其刚接触试件的微秒级时间间隔内,通过固定在入射杆上的应变片测得的瞬时应变反馈到示波器后显示的电压变化曲线,可以计算得到其过载加速度。通过示波器能够得出一次加载实验过程中的电压 U 随时间 t 的关系,由于实验中在入射杆同一圆周的对称位置粘贴 2 片相同的应变片,且实验所用电桥为半桥,因而可以得到应变与电压的关系

$$\varepsilon = \frac{2}{KAU_1}U \tag{1}$$

式中： ε 为应变， K 为应变片灵敏度系数， A 为超动态应变仪设定增益， U_1 为超动态应变仪设定桥压。
对电压变化曲线进行微分，结合加速度与应变的关系，得出试件所受的加速度 a

$$a = c \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{2}$$

$$c^2 = E/\rho \tag{3}$$

式中： c 为压杆中的弹性应力波速， E 为弹性模量， ρ 为密度。

本实验中， K 取 2.00， A 取 1 000， U_1 取 4 V；入射杆、透射杆和吸收杆的规格依次为 $\varnothing 37\text{ mm}\times 2\,500\text{ mm}$ 、 $\varnothing 37\text{ mm}\times 2\,000\text{ mm}$ 和 $\varnothing 37\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ ，且材质均为 60Si2MnA 高强度钢，其密度 $\rho=7.85\text{ g/cm}^3$ ，弹性模量 $E=200\text{ GPa}$ 。由式 (3) 计算可得压杆中的弹性应力波速 $c=5\,172.2\text{ m/s}$ 。

1.3 试样准备

实验选用同一型号、同一批次的电子引火元件，内含桥丝附于桥膜上，单个钽电容与单个控制芯片组成电子控制模块，元件的具体参数如表 1 所示。起爆器在延期状态下的输出电压为 22 V，误差在 $\pm 5\%$ 以内。起爆器延期时间小于 1 000 ms 时，误差在 $\pm 1\%$ 以内；延期时间大于 1 000 ms 时，误差在 $\pm 5\%$ 以内。单电容电路的模块中，电容存储的电量用于引燃药头，芯片用于控制延期和管理通信的电量由起爆器直接提供。如图 2 所示，在发出授时充电指令后，起爆器向芯片充电，随后可进行延期设置和组网操作。芯片收到充高压指令后，打开开关 K_1 为起爆电容充电；收到延期指令后，芯片控制开关 K_2 连通电容与桥丝回路，释放电能并引燃药头，完成起爆流程。

表 1 电子引火元件各组件类型及参数
Table 1 Types and parameters of electronic igniter components

Capacitor type	Capacitance/ μF	Model	Bridge wire material	Resistance/ Ω	Chip
Tantalum	22	22K20	Nickel chromium alloy	2	Fourth generation

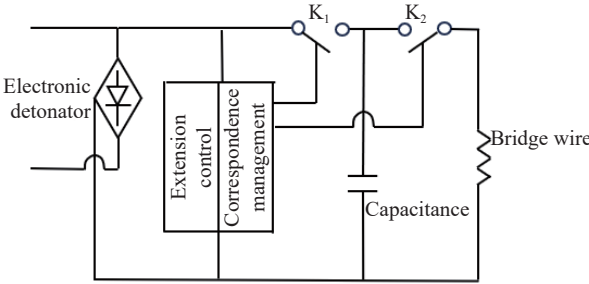


图 2 单电容电路工作原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of a single-capacitor circuit working principle

将钽电容外侧的黑塑胶剥离，在电容两端焊接导线，用于监测电压变化。作为电子控制模块的核心组件，芯片的抗振性能也尤为重要。为此，首先将电容从模块中分离出来，焊接在 PCB 板上，利用导线将电容连接到模块以形成闭合回路。然后，固定好 PCB 板，确保模块与电容之间的导线足够长，以免在撞击时被拉断，且为防止焊点短路，需在焊点外侧添加薄层绝缘材料。最后，在电子引火元件的尾端焊接电子雷管专用脚线，将其放入 $\varnothing 6.9\text{ mm}$ 的铝管壳中并进行卡口，制成电子雷管模型。由此形成整体电子控制模块(模型 A)和分离出钽电容的其余电子控制模块(模型 B)2 种实验模型，如图 3 所示。

在实际爆破中，先爆炸孔的爆轰波会对后爆炸孔内的数码电子雷管产生侧向冲击，因此，本研究采用侧向加载方式。制作外径为 20 mm、长度为 15 mm 的圆柱形钢锭，该钢锭所用材质与压杆材质相同，在曲面中心位置穿 $\varnothing 6.9\text{ mm}$ 的圆孔，将制备好的 2 种电子雷管模型分别放入圆孔内，采用紧配合固定，制成 A 型试件和 B 型试件。

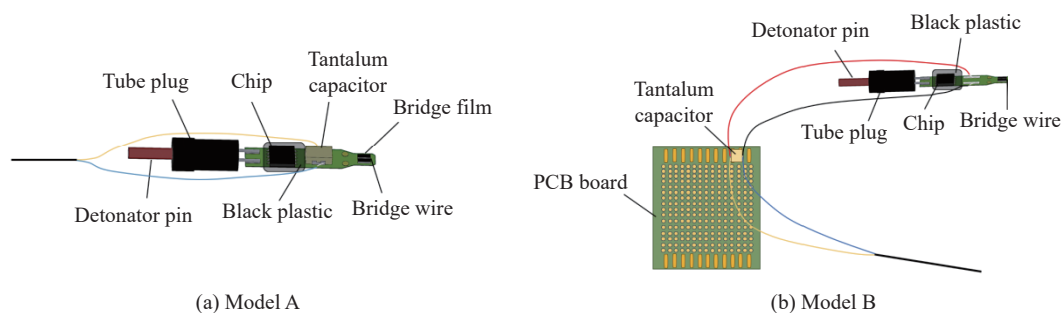


图 3 2 种实验模型

Fig. 3 Two experimental models

2 实验结果与分析

2.1 非加载实验

将准备的 2 种连线方式的电子雷管试件分别接入起爆网络, 延期时间设置为 3 000 ms, 在不受高过载加载的情况下进行起爆。延期结束后, 用起爆器重新检测, 结果显示桥丝断开, 电子控制模块正常, 剥开管壳, 观察发现桥丝有明显熔断现象。延期及起爆过程中电容两端电压的变化曲线如图 4 所示。由于非专业焊线及外加导线等原因, 电压变化曲线粗细不均匀。

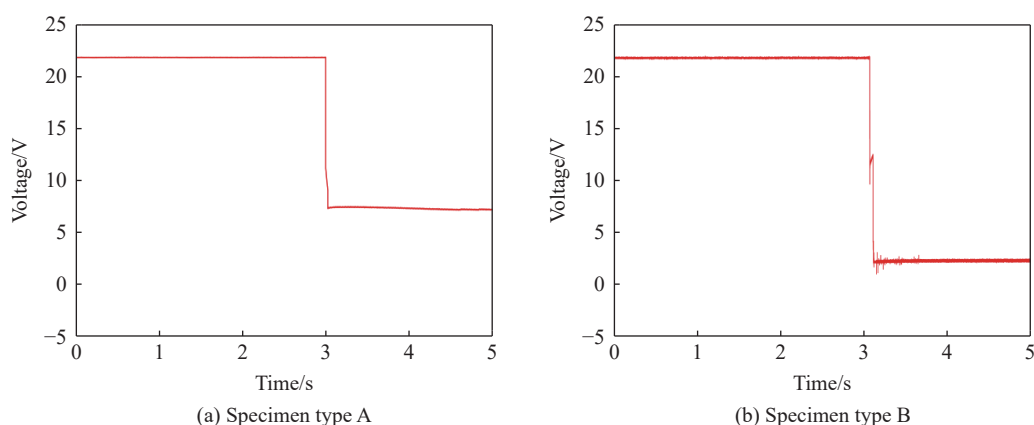


图 4 2 种试件在未受高过载时的电容电压变化

Fig. 4 Capacitance voltage variation of the two specimens under normal operating conditions of high load

在延期过程中, 电容电压稳定在起爆器输出电压 22 V 左右。延期结束瞬间, 电容收到起爆指令, 传递电量熔断桥丝, 导致电压骤降。由图 4 可知, A 型和 B 型试件内钽电容的电压分别降低至 7.5 和 2.2 V 后趋于平缓, 在熔断桥丝之后, 电容内还存在剩余电荷, 表明电子雷管内电容满状态时的电量足以熔断桥丝, 引燃药头。

2.2 加载实验

2.2.1 非延期状态加载实验

将 A 型和 B 型电子雷管试件依次固定于入射杆与透射杆之间, 在非延期状态下, 选取 0.3、0.6、0.9 和 1.2 MPa 氮气压力对 A 型和 B 型试件分别进行不同强度的加载, 每种强度下进行 3 次加载。除 3 次 1.2 MPa 压力连续加载的钢锭发生脆性断裂外, 其余钢锭外观均无明显变化。取出部分完好钢锭内的电子引火元件, 观察桥丝桥膜、电容及焊线部分, 如图 5 所示。从图 5 可以看出, 撞击后的桥丝桥膜、电容外观未出现异常情况, 且焊接点依然稳固牢靠。

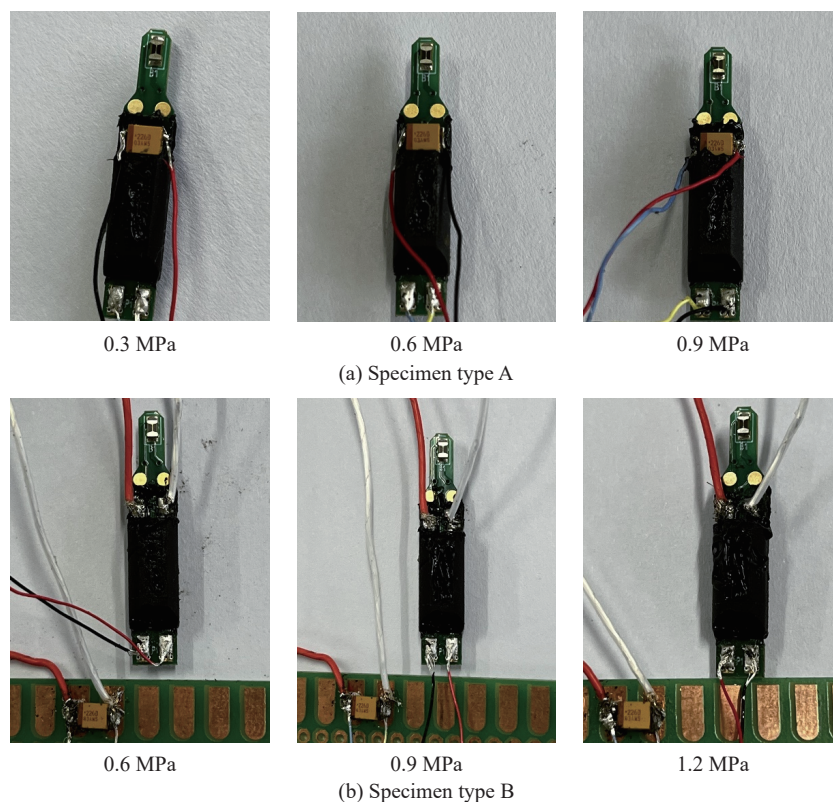


图 5 不同气压撞击后的电子引火元件

Fig. 5 Electronic ignition elements corresponding to barometric impacts

2.2.2 延期状态下加载整体模块实验

将 A 型电子雷管试件固定于入射杆与透射杆之间, 调整氮气气压(0.1~1.0 MPa 范围内取 10 个气压值), 在延期状态下对试件进行加载测试。读取试件内钽电容在延期状态下受过载影响的电压变化, 同时观察桥丝在延期结束后是否熔断, 并检测电子控制模块的有效性。有研究^[23]表明, 在高强度冲击载荷作用下, 钽电容的电容容量随弹性变形的增大而增大, 但与起始值相比, 变化量极小, 可忽略高过载时钽电容容值的改变。

本研究在子弹长度相同的条件下进行实验, 且未使用波形整形器, 因此, 所得入射杆上的脉冲宽度一致, 即实验中试件受到的有效过载加速度时间一致^[20, 24-25]。以 0.2 MPa 气压下的入射杆脉冲信号及过载加速度为例, 说明实验中的冲击作用时间。图 6(a) 给出了 0.2 MPa 气压下入射杆受到撞击时的电

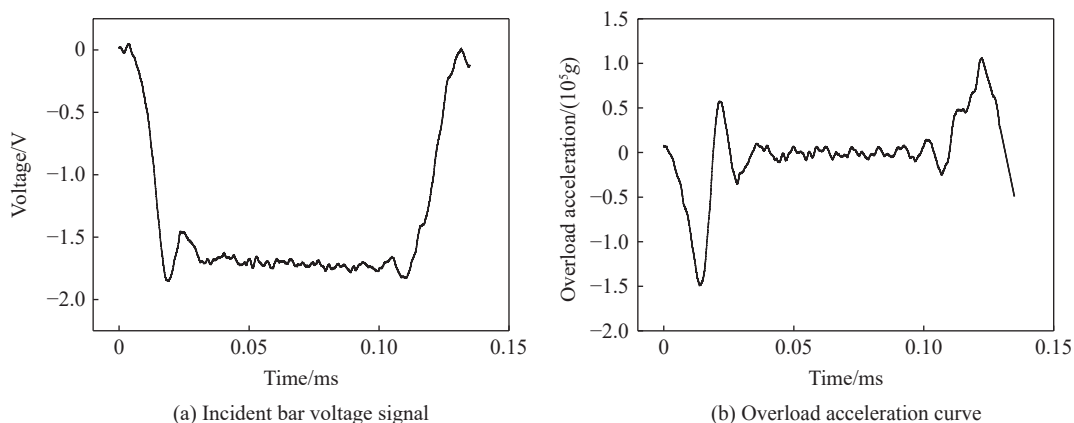
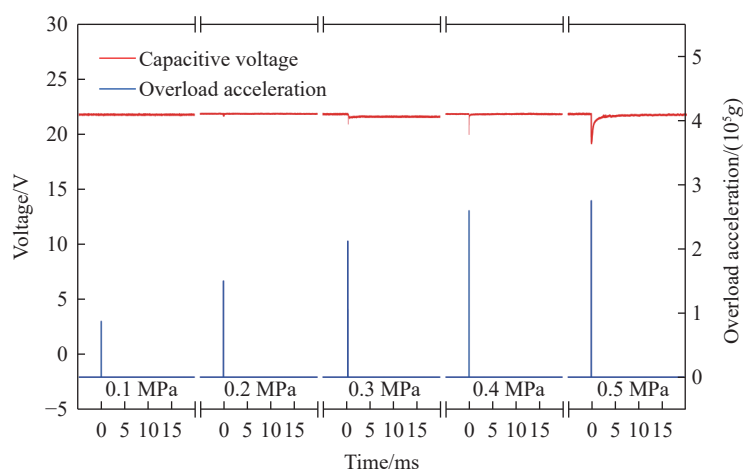


图 6 0.2 MPa 气压下的入射杆电压信号及对应的过载加速度

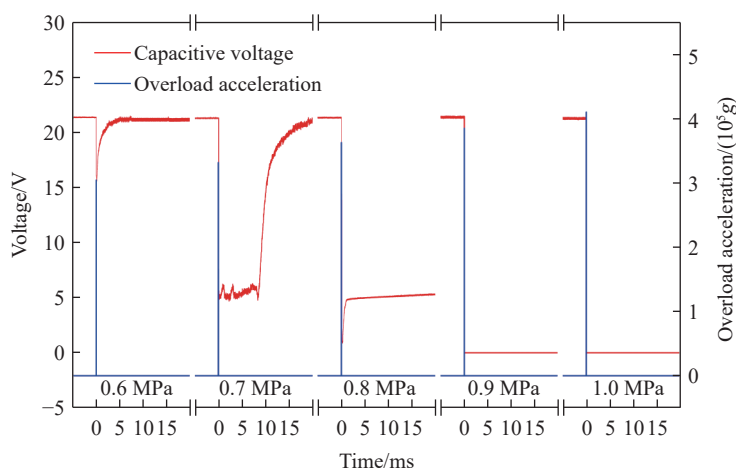
Fig. 6 Incident bar pulse signal and corresponding overload acceleration under 0.2 MPa

压信号, 脉冲持续时间约为 $130\ \mu\text{s}$ 。通过式 (1)、式 (2) 和式 (3) 可以得出试件所受的过载加速度, 过载加速度时程曲线如图 6(b) 所示。应力波加载后, 试件所受的过载加速度迅速达到最大负峰值, 之后应力波在试件与两压杆接触面间传播时进行反射和透射, 过载加速度在零附近振荡衰减。经过约 $110\ \mu\text{s}$, 应力波开始卸载, 过载加速度随之达到最大正峰值, 之后逐渐减小至零。整个加载过程持续约 $130\ \mu\text{s}$, 其中最大负峰作用时间约为 $20\ \mu\text{s}$, 最大正峰作用时间约为 $30\ \mu\text{s}$ 。当增大撞击压力时, 子弹速度也随之改变, 会使得过载加速度峰值相应增大, 但试件从加载到卸载的时间仍维持在 $130\ \mu\text{s}$ 。

图 7 给出了 A 型试件在延期过程中钽电容电压随冲击载荷的变化。由于整体有效加载时间与电容电压变化时间相比很小, 因此, 图 7 中过载加速度取最大值。当气压为 $0.1\ \text{MPa}$ 时, 过载加速度为 $8.65 \times 10^4 g$ (g 为重力加速度), 电压与施加过载之前一致, 未有明显变化。当气压增加至 $0.2\ \text{MPa}$ 时, 过载加速度为 $1.494 \times 10^5 g$, 电压在受过载瞬间从 $21.84\ \text{V}$ 下降至 $21.62\ \text{V}$, 下降了 $0.22\ \text{V}$, 然后在不到 $1\ \text{ms}$ 时间间隔内回到初始电压值并稳定。当气压增加至 $0.3\ \text{MPa}$ 时, 过载加速度为 $2.113 \times 10^5 g$, 电压在受过载瞬间从 $21.77\ \text{V}$ 下降至 $20.85\ \text{V}$, 下降了 $0.92\ \text{V}$, 而后升至 $21.57\ \text{V}$ 并趋于平稳, 与初始电压稍有偏差, 但不影响雷管的正常起爆。当气压继续增加, 过载达到 $2.586 \times 10^5 g$ 和 $2.742 \times 10^5 g$ 时, 电压也分别下降了 1.90 和 $2.70\ \text{V}$ 。当气压为 0.4 和 $0.5\ \text{MPa}$ 时, 电压在骤降到一定值后开始抬升, 由于连接的起爆器一直为高压恒压充电状态, 因此, 上升速率随电压增大而减小, 电压上升曲线为钽电容恒压充电过程中的电压变化。



(a) Variation of capacitance voltage under 0.1–0.5 MPa



(b) Variation of capacitance voltage under 0.6–1.0 MPa

图 7 A 型试件延期过程中过载加速度与电容电压的关系

Fig. 7 Relationship between overload acceleration and capacitance voltage during the postponement process of specimen type A

当气压增加至 0.6 MPa, 电容电压的变化规律与气压为 0.5 MPa 时相似, 在过载加速度达到 $3.043 \times 10^5 g$ 后, 电压从 21.40 V 降至 15.58 V, 下降了 5.82 V。当气压增加到 0.7 MPa 时, 过载加速度为 $3.316 \times 10^5 g$, 电压瞬间从 21.30 V 降低至 4.85 V, 并在 5 V 上下波动近 8.5 ms 后上升, 上升速率随电压增大而减缓, 整个变化过程持续约 20 ms; 在此气压下, 电压下降了 16.45 V。而当气压为 0.8 MPa, 过载加速度达到 $3.625 \times 10^5 g$ 时, 电压在骤降到 0.87 V 后在近 20 ms 的时间内只回升至 5.30 V。气压继续增大后, 过载加速度达到 $3.848 \times 10^5 g$, 电容电压从 21.40 V 直降至零后不再变化。

利用起爆器逐一检测施加过载后的试样, 发现 0.1~0.6 MPa 气压撞击的试样检测显示桥丝断开, 剥开管壳发现桥丝有明显烧灼熔断痕迹。0.7 MPa 气压撞击的试样显示雷管合格, 剥开管壳发现桥丝与未施加加载前一致, 没有熔断, 对该试样进行第 2 次起爆, 在延期结束瞬间, 可以清楚地看到桥丝位置有火光显现, 即桥丝正常熔断。0.8 MPa 气压加载的试样检测显示雷管合格, 但二次起爆时仍拒爆, 用万用表测量该试样的钽电容容值, 发现电容值超出原始数量级, 多次测量后电容值又能保持在原始值的有效误差以内, 再对该试样进行多次起爆后发现桥丝也能熔断。对 0.9 和 1.0 MPa 气压撞击的模块检测显示通信错误, 剥开管壳发现桥丝未熔断。

结果表明, 0.6 MPa 及以下气压对处于管壳内的钽电容稳定性存在影响, 在受到冲击载荷时出现短路失效现象, 然后在较短时间内各参数恢复至原来的量级, 这与钽电容内部的特殊阴极材料有关^[26-27], 它能够保证电容电压在一定时间内回到起始值, 不影响延期结束后的正常起爆。电压回升至初始值可以确保起爆器在延期阶段保持电容电压稳定, 但电容与桥丝、芯片相连, 存在外部放电电路, 因此, 电压下降除了钽电容内部介电层被击穿导致短路失效的原因外, 还应考虑连接电容与桥丝的开关 K_2 在过载瞬间短暂闭合, 导致电容电量流失进入桥丝线路, 使桥丝未到延期结束就已熔断, 造成雷管早爆。当电子雷管试件承受 0.7 MPa 气压撞击后, 由于模块在延期结束瞬间受高过载或跌落振动影响, 电容内电压过低使得残存的电荷量不足以熔断桥丝, 而该加载压力下的过载并未对电容内部结构造成致命损伤, 钽电容依旧能够自愈, 导致模块第 1 次无法成功起爆而能成功二次起爆。上述现象在现场工况出现的频率不减, 因后爆炮孔内电子雷管在延期阶段结束时受到来自先爆炮孔爆炸产生的冲击波的影响, 电容处于低压不足状态, 即使芯片正常传递指令, 残留的电量也无法引燃药头, 致使雷管拒爆。当气压增加到 0.8 MPa 时, 钽电容受高过载影响, 无法在有限时间内回到稳定状态, 导致延期结束时内部存储的电量无法满足桥丝熔断要求。当试件承受 0.9 和 1.0 MPa 气压撞击后, 过高的载荷导致内部电量全部流失, 电容彻底损伤且无法逆转, 失去存储电荷的能力; 而芯片在该加载下的损伤状态难以判断, 起爆器显示的通信错误表明可能存在电容、芯片或电路内其他元件的损坏。

实验中需剥开包裹在钽电容外的黑塑胶, 并且在电容上固定薄层绝缘材料, 同时模块与管壁间还存有薄空气层, 因此, 与未剥胶的电容抗过载效果存在些许差异。试件完成一次撞击后, 会跌落到地面上再次发生碰撞, 本研究的不足之处是实验中未考虑跌落对电子引火元件稳定性的影响。

2.2.3 延期状态下单独加载芯片实验

由整体模块加载实验可知, 芯片的抗过载能力强于电容, 在电容受撞击短暂失效时芯片仍能正常通信。将 B 型电子雷管试件固定于入射杆与透射杆之间, 同样调整氮气压力, 取 0.7~1.2 MPa 范围内 6 个压力进行加载测试, 每个压力下分别进行 3 次撞击实验。

对所得实验结果进行对比分析, 发现电压变化规律较为相似, 大致可以分为 2 类。图 8 给出了 B 型试件受不同过载时出现的 2 种电容电压变化类型。从图 8(a) 可以看出, 类型 I 的电压在延期过程中保持在起爆器的输出电压 22 V 左右, 当 3 000 ms 延期结束后, 电压骤降至 3.8 V 之后保持稳定, 用起爆器重新检测雷管, 结果显示桥丝断开。由此可知, 电容内存储的大部分电量能够在规定的延期时间内传输至桥丝并将其熔断, 芯片在该过载条件下能够正常工作且电路畅通完整。从图 8(b) 可以看出, 类型 II 的电容电压一直稳定不变, 因过载强度太大, 芯片或电路板上其他元件受损, 导致电容内电量无法释放, 重新检测雷管显示通信错误, 剥开管壳观察桥丝无发火痕迹。实验所得 B 型试件在高过载加载下模块各组件的失效情况如表 2 所示。

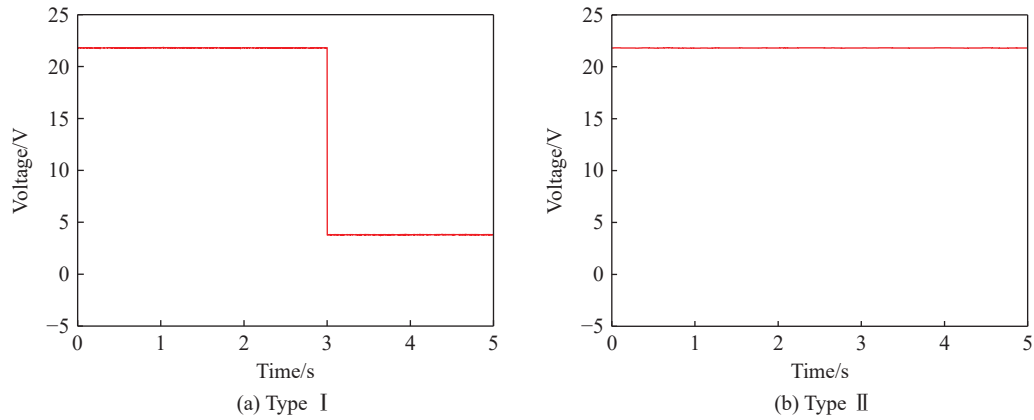


图 8 B 型试件受高过载时的电容电压变化

Fig. 8 Capacitance voltage variation of specimen type B under high overload condition

表 2 B 型试件在高过载加载下各组件的失效情况

Table 2 Failure conditions of components of specimen type B under high overload

Pressure/ MPa	Maximum overload/(10 ⁵ g)	Voltage change corresponding type chart	Sample module failure case		
			Bridge wire	Chip	Circuit board
0.7	3.447	Type I	Melted	Normal	Normal
	3.506	Type I	Melted	Normal	Normal
	3.328	Type I	Melted	Normal	Normal
0.8	3.684	Type I	Melted	Normal	Normal
	3.731	Type I	Melted	Normal	Normal
	3.776	Type I	Melted	Normal	Normal
0.9	3.817	Type II	Unmelted, non-ablation trace	Normal	Resistor failure
	3.984	Type I	Melted	Normal	Normal
	3.759	Type I	Melted	Normal	Normal
1.0	4.155	Type I	Unmelted, ablation, deformation, discoloration	Abnormal	Normal
	4.086	Type I	Melted	Normal	Normal
	4.167	Type II	Unmelted, non-ablation trace	Abnormal	Normal
1.1	4.235	Type II	Unmelted, non-ablation trace	Abnormal	Normal
	4.173	Type I	Unmelted, ablation, discoloration	Abnormal	Normal
	4.249	Type II	Unmelted, non-ablation trace	Normal	Resistor failure
1.2	4.472	Type II	Unmelted, non-ablation trace	Abnormal	Normal
	4.581	Type II	Unmelted, non-ablation trace	Abnormal	Resistor failure
	4.426	Type II	Physical bending	Abnormal	Resistor failure

4.100×10⁵g 以下的过载对模块内的芯片没有影响。当过载达到 4.249×10⁵g 时, 芯片检测正常, 但在 4.155×10⁵g 的过载下出现异常, 可见同一批次的芯片在出厂质量上无法保证完全一致; 抗冲击载荷的差异还应考虑芯片外部黑塑胶的注塑压力以及制作试件时将模块塞入管壳时预留的空气层。芯片在 4.155×10⁵g 和 4.173×10⁵g 过载后出现通信错误, 桥丝有烧灼痕迹, 可见试件在受冲击后有电流经过桥丝, 但产生的热量无法保证引燃药头。受冲击载荷的影响, 在芯片由完好到损坏的过程中, 控制连接电容与桥丝的开关可能短暂打开, 因电容内逃逸的电荷量有限, 在短时间进入桥丝后无法将其熔断, 只出现烧灼痕迹; 而起爆器在芯片受损后无法传递指令维持对电容的高压充电, 电压在延期结束前就已出现与图 8(a) 中的类型 I 相似的变化, 且电压下降幅度小很多。当过载加速度达到 4.200×10⁵g 以上时, 芯

片检测出现通信错误,说明过高的加载会使芯片直接损坏,在延期结束时无法控制开关传递电量熔断桥丝。在 $3.817 \times 10^5 \text{g}$ 和 $4.249 \times 10^5 \text{g}$ 过载下,芯片检测正常,桥丝未熔断且无烧灼痕迹,考虑到电路板上焊件繁多复杂,对板上除芯片外的其他元件和电路进行检测,发现存在个别电阻损坏,而损坏的电阻会阻碍电路畅通,在延期结束时电荷无法正常传递,引起拒爆。爆破作业中雷管内的电容和芯片要同时承受先爆炮孔释放的冲击波,因此,要以模块整体承受极限为阈值,全面考虑雷管各组件性能,提升雷管的抗冲击载荷能力。

本研究对整体电子控制模块和剥离出钽电容的其余电子控制模块进行加载,气压范围为 $0.1 \sim 1.2 \text{MPa}$,过载加速度最高达到 $4.581 \times 10^5 \text{g}$ 。试件在加载后随即受到应力波的影响,应力脉冲持续时间在百微秒量级,因钢锭材质与压杆材质相同,观察管壳并未受到挤压,且试件内部模块与管壁间留有空气层和黑塑胶,使得模块受应力波影响很小。在现场爆破环境中,火工品爆炸产生的冲击过载持续时间远长于本研究中试件承受过载时间,因受到 SHPB 实验特性的限制,这一不足尚难以改善。此外,在实际工况中,炮孔内雷管受到的过载并非单次,多次连续的冲击波叠加效应会使电子控制模块更易出现问题。本研究难以准确模拟现场作业时雷管所处环境,但能够监测并分析雷管内元件在受高过载时出现的失效现象,可为电子雷管的可靠性改进提供方向。

3 结 论

利用 SHPB 测试系统,对含整体电子控制模块的雷管试件和含分离出钽电容的其余电子控制模块的雷管试件,在延期状态下进行了不同强度的高过载加载测试,得到以下主要结论。

(1) 管壳内钽电容最先失稳,在达到 $1.495 \times 10^5 \text{g}$ 过载时电容出现短路掉电现象,此时钽电容由于其自愈特性,能够在一定时间内恢复至起始值。而过载达到 $3.848 \times 10^5 \text{g}$ 后,钽电容损坏且无法逆转。

(2) 电子控制模块其余组件的抗冲击能力强于电容,在 $4.155 \times 10^5 \text{g}$ 过载后芯片出现异常,而电阻的损坏基本出现在 $4.249 \times 10^5 \text{g}$ 以上过载。

(3) 受实验条件所限, SHPB 测试系统无法准确模拟现场爆破作业时电子雷管所处环境,但实验可为电子控制模块在延期状态下受冲击载荷失效性研究提供方向,为电子雷管的使用可靠性提供保障。

参考文献:

- [1] 徐振相,周彬,秦志春,等.微电子火工品的发展及应用[J]. [爆破器材](#), 2004, 33(Suppl 1): 29–34.
XU Z X, ZHOU B, QIN Z C, et al. Development and application of the micro-electric detonator [J]. [Explosive Materials](#), 2004, 33(Suppl 1): 29–34.
- [2] 颜景龙. 中国电子雷管技术与应用[J]. [中国工程科学](#), 2015, 17(1): 36–41.
YAN J L. Technology and application of Chinese electronic detonator [J]. [Strategic Study of CAE](#), 2015, 17(1): 36–41.
- [3] KARA S, ADAMSON W R, REISZ W J, et al. The latest generation of the electronic system enhanced safety and productivity [J]. [Procedia Engineering](#), 2014, 83: 432–440.
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业数码电子雷管: WJ 9085—2015 [S]. 2015.
Ministry of Industry and Information Technology. Industrial digital electronic detonator: WJ 9085—2015 [S]. 2015.
- [5] CARDU M, GIRAUDI A, ORESTE P. A review of the benefits of electronic detonators [J]. [Rem: Revista Escola de Minas](#), 2013, 66(3): 375–382.
- [6] 汪旭光,沈立晋. 工业雷管技术的现状和发展[J]. [工程爆破](#), 2003, 9(3): 52–57.
WANG X G, SHEN L J. The state-of-the-arts of industrial detonators [J]. [Engineering Blasting](#), 2003, 9(3): 52–57.
- [7] 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 matchhead performance [J]. [Journal of Sichuan Ordnance](#), 2014, 35(5): 128–131.
- [8] 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, 49.
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, 49.

- [9] LENG Z D, SUN J S, LU W B, et al. Mechanism of the in-hole detonation wave interactions in dual initiation with electronic detonators in bench blasting operation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 129: 103873.
- [10] 冷振东, 范勇, 涂书芳, 等. 电子雷管起爆技术研究进展与发展建议 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(1): 142–154.
LENG Z D, FAN Y, TU S F, et al. Electronic detonator initiation technology: research progress and development strategies [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(1): 142–154.
- [11] REN D M, HOU J H, DUAN J R, et al. Failure mode analysis of electronic detonator under high overload condition [J]. *FirePhysChem*, 2022, 2(2): 199–205.
- [12] 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.
- [13] 杨文. 工业电子雷管抗冲击性能研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2023.
YANG W. Research on impact resistance performance of industrial electronic detonator [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2023.
- [14] 李长龙, 高世桥, 牛少华, 等. 高冲击环境对引信用储能电容性能的影响 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(Suppl 2): 16–22.
LI C L, GAO S Q, NIU S H, et al. Effect of high-g shock environment on performances of energy-storage capacitors used in fuse [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(Suppl 2): 16–22.
- [15] TEVEROVSKY A. Effect of mechanical stresses on characteristics of chip tantalum capacitors [J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2007, 7(3): 399–406.
- [16] 王家乐, 李洪伟, 王小兵, 等. 冲击载荷作用下钽电容的电压瞬变特性及微观机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(4): 043101.
WANG J L, LI H W, WANG X B, et al. Voltage transient characteristics and microscopic mechanism of tantalum capacitors under impact load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(4): 043101.
- [17] 张学舜, 王娜, 沈瑞琪. 自由式霍普金森杆测量火工品过载加速度的数值模拟 [J]. *爆破器材*, 2004, 33(Suppl 1): 39–42.
ZHANG X S, WANG N, SHEN R Q. Numerical simulation on the acceleration of initiator over-loaded by freedom Hopkinson bar [J]. *Explosive Materials*, 2004, 33(Suppl 1): 39–42.
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 高应变速率高温压缩试验方法: GB/T 42900—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-high strain rate compression test method at elevated temperature: GB/T 42900—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [19] 赵芷伊. 电火工品在电磁发射过程中的力学过载效应研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
ZHAO Z Y. Study on the mechanical overload effect of electric explosives during electromagnetic launch [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [20] 邓琼, 李玉龙, 索涛, 等. 火工品高过载动态力学性能测试方法研究 [J]. *火工品*, 2007(1): 28–31.
DENG Q, LI Y L, SUO T, et al. Test method on dynamic mechanical behavior of initiating explosive device under high acceleration [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(1): 28–31.
- [21] 王凯民, 张学舜. 火工品工程设计与试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 252–255.
WANG K M, ZHANG X S. Engineering design and test technology of initiators & pyrotechnics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 252–255.
- [22] 刘虎, 张蕊, 付东晓, 等. 半导体桥火工品力学过载下的结构失效研究 [J]. *火工品*, 2012(1): 30–33.
LIU H, ZHANG R, FU D X, et al. Study on structure failure of SCB initiator under high overload [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(1): 30–33.
- [23] 李长龙, 高世桥, 牛少华, 等. 高冲击下引信用固态钽电容的参数变化 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 419–425.
LI C L, GAO S Q, NIU S H, et al. Parameters variation of solid tantalum capacitors used in fuze under high-g shock [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 419–425.
- [24] 王娜. 冲击波加载过程中火工品的受力分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
WANG N. Mechanical analysis of initiator in loading of shock wave [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [25] 王娜, 沈瑞琪, 叶迎华. 霍普金森杆测量火工品过载情况的研究与数值模拟 [J]. *火工品*, 2004(1): 42–47.

- WANG N, SHEN R Q, YE Y H. Study on the measurement of over-loaded initiator by Hopkinson bar and numerical simulation [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2004(1): 42–47.
- [26] TEVEROVSKY A. Breakdown and self-healing in tantalum capacitors [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, 28(2): 663–671.
- [27] TEVEROVSKY A. Scintillation and surge current breakdown voltages in solid tantalum capacitors [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(4): 1134–1142.

Experimental Study on High Overload Loading of Electronic Control Module inside Electronic Detonator under Delayed State

YE Ziyang¹, WU Hongbo¹, YANG Shichun², HUANG Guoshu¹, LI Tianhao¹,
SUN Yi³, MA Chengshuai⁴, REN Mengyu¹

(1. *School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*

2. *Anhui Jiangnan Chemical Industry Co., Ltd., Hefei 230031, Anhui, China;*

3. *Wuxi Holyview Microelectronics Co., Ltd., Wuxi 214000, Jiangsu, China;*

4. *Anhui Zhongjin Lihua Mining Engineering Co., Ltd., Anqing 246003, Anhui, China)*

Abstract: In order to explore the failure mechanism of the electronic control module inside the electronic detonator under impact load during the postponement state, a split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment was conducted on the electronic detonator specimens under high overload loading. The failure conditions of the overall electronic control module and the remaining electronic control modules separated from the tantalum capacitors were obtained under different levels of loading experiments. The results indicate that the tantalum capacitor exhibited a voltage drop phenomenon at an overload of $1.495 \times 10^5 \text{g}$, with a more pronounced short-circuit failure as the overload increased. Within a certain overload range, the tantalum capacitor's unique self-healing properties allow it to return to its initial level rapidly. However, when the overload exceeded the critical threshold of $3.848 \times 10^5 \text{g}$, the tantalum capacitor was irreversibly damaged. The overload resistance of other components within the module is stronger than that of the capacitor. The chip detected an anomaly after an overload of $4.155 \times 10^5 \text{g}$, while the failure of the resistor components occurs at an overload of over $4.249 \times 10^5 \text{g}$.

Keywords: electronic detonators; electronic control module; split Hopkinson pressure bar; high overload; failure