

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0232

# 冲击载荷作用下钽电容的电压瞬变特性及微观机理\*

王家乐<sup>1</sup>, 李洪伟<sup>1</sup>, 王小兵<sup>2</sup>, 梁昊<sup>1</sup>, 周恩<sup>1</sup>, 苏洪<sup>1</sup>, 赵金耀<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽淮南 232001;  
2. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽马鞍山 243000)

**摘要:** 为探究钽电容在冲击载荷作用下的失效机制, 设计并开展了5组不同强度的钽电容水下爆炸冲击实验, 研究了冲击载荷作用下钽电容的电压瞬变特性, 通过漏电、充电电流变化分析了钽电容的失效模式, 利用扫描电镜观察钽电容的微观结构, 讨论了冲击载荷作用下钽电容的失效机理。结果表明: 钽电容受冲击后发生短路失效, 电压大幅度降低, 在自愈完成后电压缓慢上升。随着冲击波超压的增大, 钽电容失效的概率增大, 钽电容失效的临界超压约为32 MPa。不同类型的电压变化对应不同的失效模式, 包括击穿后瞬间自愈、击穿后缓慢自愈和多次击穿自愈。不同类型电压变化的初始漏电流峰值有较大差别, I类电流峰值为2.5~5 A, II类为1~2 A, III类为8~9 A, 且峰值越大, 峰宽越小。冲击载荷作用下钽电容的微观失效机理与其氧化膜的瑕疵相关, 机理包括氧化膜中微裂缝扩展使得局部电场强度超过击穿场强造成击穿、氧化膜较薄区域下方的杂质及晶态膜突出形成导电通道、贯穿型裂缝形成后气体电离导致的击穿。

**关键词:** 钽电容; 冲击载荷; 水下爆炸; 电子雷管

中图分类号: O383

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

## Voltage transient characteristics and microscopic mechanism of tantalum capacitors under impact load

WANG Jiale<sup>1</sup>, LI Hongwei<sup>1</sup>, WANG Xiaobing<sup>2</sup>, LIANG Hao<sup>1</sup>, ZHOU En<sup>1</sup>, SU Hong<sup>1</sup>, ZHAO Jinyao<sup>1</sup>

(1. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology,

Huainan 232001, Anhui, China;

2. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan 243000, Anhui, China)

**Abstract:** To investigate the failure mechanism of tantalum capacitors under shock loads, shock experiments were conducted on tantalum capacitors using shock waves generated by underwater explosions with an electronic detonator. Five groups of experiments with different shock intensities were designed by varying the distance between the capacitor and the electronic detonator. The transient voltage characteristics of tantalum capacitors under different intensity shock loads were studied. The voltage variations of tantalum capacitors were explained based on the changes in internal leakage current and external charging current, and the failure modes of tantalum capacitors were analyzed. Scanning electron microscopy was utilized to observe the microstructure of damaged areas in tantalum capacitors and the micro-failure mechanisms of tantalum capacitors under shock loads were discussed. The results indicate that tantalum capacitors experience short-circuit failures after shocks, with a significant decrease in voltage initially, followed by a slow rise and self-recovery. As the shock wave overpressure increases, the probability of tantalum capacitor failure increases, with a critical overpressure threshold of approximately 32 MPa. Different types of voltage variations correspond to different failure modes, including instant self-recovery after breakdown,

\* 收稿日期: 2023-06-30; 修回日期: 2023-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(52104074)

第一作者: 王家乐(1999—), 男, 硕士研究生, 872646853@qq.com

通信作者: 李洪伟(1979—), 男, 硕士生导师, 教授, lihw@aust.edu.cn

slow self-recovery after breakdown, and repetitive breakdown with self-recovery. Different types of voltage variations exhibit significant differences in the peak values of initial leakage currents, with the first type ranging from 2.5 A to 5 A, the second type ranging from 1 A to 2 A, and the third type ranging from 8 A to 9 A. Moreover, larger peak values of leakage currents result in narrower peak widths. The micro-failure mechanisms of tantalum capacitors under shock loads include the propagation of microcracks within the oxide film leading to excessive local electric field strength and breakdown, impurities and surrounding crystalline oxide film protruding to form conductive channels in the region of thinner oxide film, and the formation of through-cracks followed by gas ionization leading to breakdown.

**Keywords:** tantalum capacitor; shock loading; underwater explosion; electronic detonator

数码电子雷管凭借其延期精度高、安全性强等优点被广泛应用于爆破工程,但在隧道、孔桩、巷道掘进等小孔距爆破应用场景下,该雷管在受到邻近炮孔爆炸产生的冲击作用后可能出现拒爆现象。数码电子雷管受冲击后的拒爆与其电容参数漂移有关<sup>[1-2]</sup>。钽电容是数码电子雷管中一种主流的电容量类型,作为数码电子雷管内部的储能元件,其可靠性直接决定了数码电子雷管能否正常发火。因此,有必要对钽电容在冲击载荷下的性能变化开展研究。

早期对钽电容的失效研究主要考虑环境温度、浪涌电流和高压负载等影响因素。随着钽电容的应用场景愈加广泛,面临的环境愈加恶劣,研究人员开始考虑外部压力对钽电容的影响。如 Teverovsky<sup>[3]</sup>对钽电容进行了轴向压缩实验,发现在一定范围内静态应力会增大漏电电流、降低击穿电压。在动态加载实验研究中,程融等<sup>[4]</sup>通过空气炮锤击实验发现钽电容在冲击载荷作用下会出现瞬时短路现象。李长龙等<sup>[5-6]</sup>利用马歇特锤对钽电容进行了冲击实验,发现钽电容的漏电流和容值均随着冲击强度的增大而增大。贾丰州等<sup>[7]</sup>建立了钽电容的数值模型,指出:在弹性范围内冲击载荷脉宽减小或幅值增大时,漏电电流呈增大趋势。

目前研究存在的主要问题有:冲击载荷作用下钽电容的短路机制尚不清晰,漏电流检测方式不合理(电容器在正常工作状态下外部充电电流约等于内部漏电电流,但在瞬态短路的情况下,两者差别较大)。为了揭示钽电容在爆炸冲击作用下的失效机理,本文中,采用水下爆炸的方法对钽电容进行冲击实验,分析钽电容在冲击载荷下的电压变化特性,计算钽电容内部的漏电电流,观测钽电容内部的微观结构变化,并阐述其失效机理。

## 1 实 验

### 1.1 实验仪器及样品

主要仪器有:直径 160 cm、高 140 cm 的圆形不锈钢爆炸水池;PCB 水下压力传感器;数字储存示波器;4 恒流源;8 号电子雷管及起爆器;BWL 定值电阻(10 W, 100  $\Omega$ )和直流恒压电源。样品为某品牌同一生产批次同一型号的贴片钽电容,具体参数见表 1。

表 1 电容参数

Table 1 Capacitor parameters

电容类型	耐压/V	容值/ $\mu$ F	封装规格	阳极材料	阴极材料	介电层	数量
贴片钽电容	25	47	7343	Ta	MnO <sub>2</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	50

### 1.2 实验布置

在圆形爆炸水池中心处,通过配重将直径为 1 mm 的铜丝拉直,在铜丝上固定一发 8 号电子雷管作为爆源,雷管入水深度为 70 cm。用 PVC 薄膜给钽电容做防水处理后,将电容贴于固定支架上,置于水中,使电容与雷管主装药位置在同一水平线上并相距一定距离。以雷管位置为对称中心,在电容的对称点处布置水下压力传感器,压力信号通过恒流源传输至示波器,如图 1 所示。

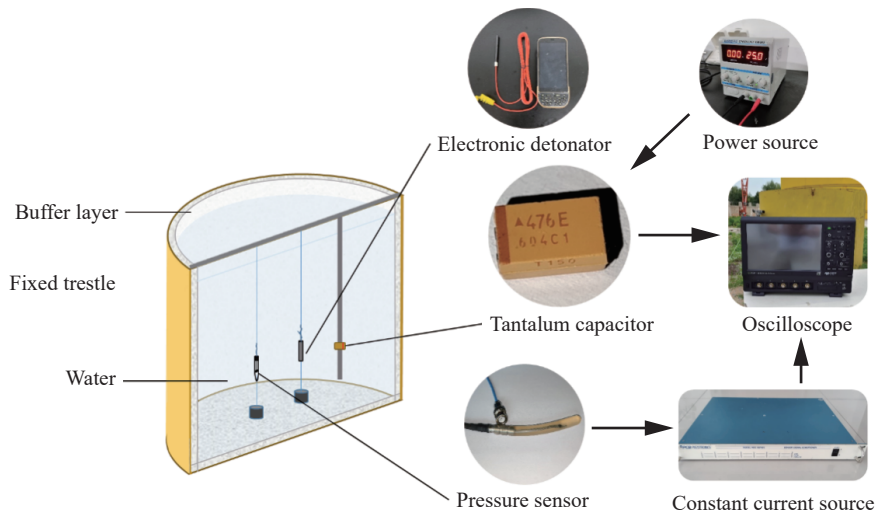


图 1 实验测试系统

Fig. 1 Experimental test system

在电路方面, 钽电容与  $100\ \Omega$  定值电阻串联, 再连接恒压直流电源形成回路。其中定值电阻起到限制浪涌电流的作用, 恒压直流电源在实验过程中持续为钽电容供电。示波器并联在电容两端, 记录爆炸冲击瞬间电容两端电压的变化, 如图 2 所示。

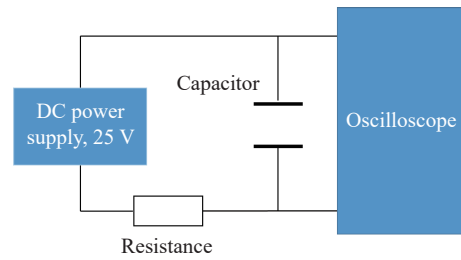


图 2 电路示意图

Fig. 2 Circuit diagram

通过调整钽电容与爆源之间的水平距离改变钽电容的受冲击强度, 分别在 13、14、15、16 和 19 cm 的水平距离下进行了 5 组实验。实验中电源供电电压为 25 V, 若钽电容受冲击后

电压变化超过 0.1 V, 则示波器触发, 记录下钽电容两端电压变化, 若示波器未触发则认为电压未发生变化或变化极小可以忽略。为减小实验误差, 同一水平距离下, 钽电容冲击实验重复 10 次。

## 2 钽电容电压瞬变特性

### 2.1 冲击波超压作用

在钽电容与爆源之间同一水平距离下, 冲击波超压测量 3 次, 取平均值, 超压测量结果见表 2。

水下球形装药爆炸产生的冲击波压力可以使用 Cole 经验公式<sup>[8]</sup> 进行计算:

表 2 不同距离下的冲击波超压

Table 2 Shock wave overpressures at different distances

距离/cm	冲击波超压/MPa			冲击波超压平均值/MPa
	第1次测量	第2次测量	第3次测量	
13	38.627	38.045	38.557	38.410
14	36.157	37.219	36.358	36.578
15	31.974	32.312	31.845	32.044
16	30.146	29.418	29.022	29.529
19	24.719	25.767	25.057	25.181

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

式中:  $p_m$  为冲击波超压峰值,  $Q$  为炸药质量,  $R$  为传感器与爆心之间的距离,  $k$  和  $\alpha$  分别为与实验相关的系数和指数。

一发 8 号电子雷管爆炸的 TNT 当量为 1 g, 按照 1 g TNT 在水下爆炸进行近似计算,  $k$  与  $\alpha$  分别取 52.27 和 1.13。将冲击波超压的实测值与 Cole 经验公式<sup>[8]</sup> 的计算值进行对比, 如图 3 所示。可以看出, 冲击波超压的实测值与计算值较为符合, 误差在合理范围内, 爆炸冲击实验设置合理有效。

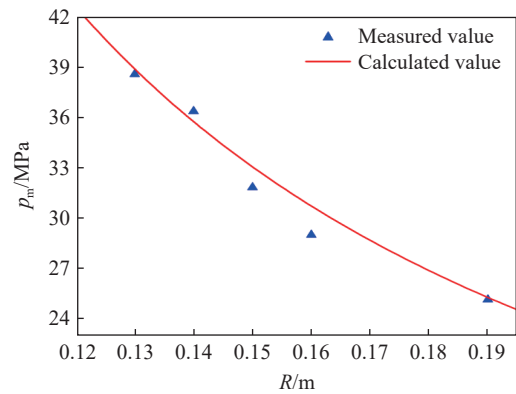


图 3 冲击波超压计算值与实测值的对比

Fig. 3 Comparison of calculated and measured shock wave overpressures

### 2.2 冲击载荷下的电压瞬变特性

通过对实验结果的分析对比, 发现大部分电压变化曲线具有相似特征。冲击载荷下钽电容的电压变化可分为 3 类, 如图 4(b)~(d) 所示。图 4(a) 表示在冲击载荷下钽电容的电压未发生变化。

I 类电压变化曲线见图 4(b), 特点为电压降低后立即升高。钽电容初始电压为 25.000 V, 在受到冲击载荷作用后的某一时刻, 电压发生断崖式下降, 经过 1.13 ms 下降至最低电压点 5.178 V。随后电压开始上升, 上升速率随着电压的上升而减缓, 约 25.00 ms 时电压基本恢复至初始水平, 电压上升过程基本符合钽电容一般的恒压充电过程。

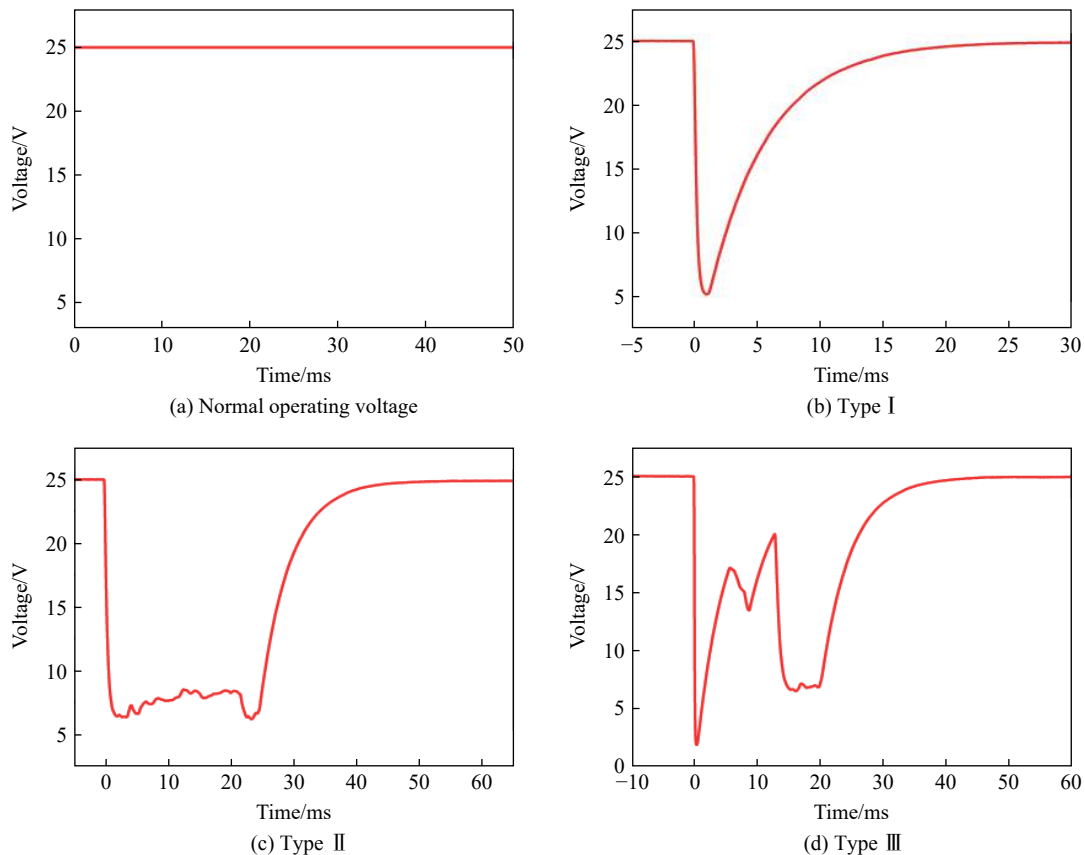


图 4 冲击载荷下钽电容的电压变化曲线

Fig. 4 Voltage change curves of a tantalum capacitor under impact load

Ⅱ类电压变化曲线见图 4(c), 特点是电压先降低, 然后在较低水平波动一段时间后再上升。用时 2.20 ms 下降至最低电压点 6.404 V, 随后电压在较低水平维持约 20 ms, 期间电压反复上下小幅度波动, 最后电压开始上升, 与Ⅰ类电压变化曲线上升过程一致。

Ⅲ类电压变化曲线见图 4(d), 特点是波形复杂, 电压反复下降上升, 同时含有与Ⅱ类电压变化曲线相同的低压波动段。受冲击作用后钽电容的电压快速下降, 用时 0.49 ms 下降至 1.925 V, 随后电压在上升至 17.102 和 20.002 V 时又出现 2 次下降, 最后一次下降后在 6.651 V 上下波动约 4.50 ms, 最终电压恢复至初始水平。

3 种类型的电压变化均表明钽电容在冲击载荷作用下出现了瞬时失效现象。电压瞬间下降意味着极板电荷大量流失, 由于钽电容外部电源持续供压, 且无外部放电电路, 因此判断放电发生在钽电容内部。即介电层  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  可能发生了击穿, 导致钽电容短路失效。

对以上 3 种类型的电压变化在不同距离下的出现频次进行统计, 如图 5 所示。

实验结果表明, 当钽电容与爆源的距离为 19 和 16 cm 时, 钽电容电压均未出现变化, 失效概率为 0%。当距离减小至 15 cm 时, 10 次冲击实验中有 5 次发生短路失效, 失效概率为 50%, 此时冲击波超压为 32.004 MPa。由此可见, 冲击波导致钽电容短路失效的临界压力约为 32 MPa。随着钽电容与爆源之间距离的进一步减小, 冲击波超压继续增大, 钽电容失效概率随之增大。

随着冲击波超压的增大, 3 种类型电压变化的出现概率均有增大趋势。20 次短路失效中Ⅰ类电压变化占比 55%, 是出现最频繁的一种电压变化类型, 其次是Ⅱ类、Ⅲ类电压变化, 分别占比 35% 和 10%, 其中Ⅲ类电压变化容易在较强冲击载荷作用下出现。

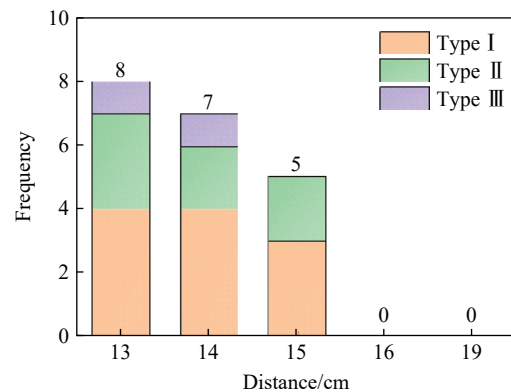


图 5 不同类型的电压变化在钽电容与爆源不同水平距离下出现的频次

Fig. 5 Frequencies of different types of voltage changes occurring at different horizontal distances between tantalum capacitor and explosion source

### 3 瞬时失效微观机理

#### 3.1 电压瞬变机理

冲击载荷作用下钽电容容值变化极小, 可忽略不计<sup>[5]</sup>, 此时钽电容两端电压与极板所带电荷量成正比, 电荷量的变化取决于外部的充电电流  $I_c$  和内部的漏电电流  $I_l$ :

$$I_c = \frac{E - U}{R} \quad (2)$$

$$I_l = C \frac{dU}{dt} - I_c \quad (3)$$

式中:  $E$  为电源电压,  $U$  为钽电容两端电压,  $R$  为串联电阻阻值,  $C$  为钽电容容值。

当充电电流大于漏电电流时, 极板电荷开始积累, 电压上升; 当充电电流小于漏电电流时, 极板电荷流失, 电压下降; 当充电电流和漏电电流相等时, 电荷量、电压不变。图 3 中 3 种类型的电压变化曲线所对应的  $I_c$  和  $I_l$  变化如图 6(b)~(d) 所示。图 6(a) 表示冲击载荷作用下充电电流与放电电流均未出现变化。

图 6(b) 对应Ⅰ类电压变化。出现Ⅰ类电压变化的可能原因是钽电容在冲击载荷作用下氧化膜被击穿,  $I_l$  迅速上升, 峰值为 2.896 A。大电流导致的局部升温使阴极  $\text{MnO}_2$  发生反应生成高阻值的  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  堵塞导电通道阻碍了电子的转移<sup>[9]</sup>, 并且电场强度的下降也使电子移动速率下降, 因此  $I_l$  达到峰

值后迅速下降。 $I_1$  上升后钽电容电压快速下降, 电源与电容之间电势差不断增大, 于是  $I_c$  开始上升。当  $I_c$  上升至与  $I_1$  相等时, 极板电荷量不再减小, 电压下降至最低点 5.178 V, 此时  $I_c$  也达到峰值。随后  $I_1$  继续减小, 在 1.68 ms 时下降至 0.4 mA, 此时可认为钽电容基本完成了自愈。由于  $I_c > I_1$ , 电荷积累, 电压上升, 随着电压上升  $I_c$  持续减小, 直至电容充电完毕。

图 6(c) 与 II 类电压变化相对应。 $I_c$  峰值为 1.503 A, 随着阴极反应的进行和电场强度的降低,  $I_1$  不断减小,  $I_c$  也随着钽电容与电源之间电势差的增大而不断增大, 这个过程中电压不断降低。在  $I_c$  与  $I_1$  交汇后,  $I_1$  并未继续减小, 而是围绕着  $I_c$  上下波动。这说明此时  $Mn_2O_3$  未完全堵塞导电通道, 漏电继续发生, 且漏电流与充电电流相当, 导致电压在较低水平波动。在波动持续了约 20.00 ms 后,  $I_1$  突然下降至 1.6 mA, 表明此时钽电容完成了自愈, 此时由于  $I_c > I_1$ , 电容电压开始上升,  $I_c$  也随着电压上升而逐步减小, 直至充电完毕。

图 6(d) 为 III 类电压变化的漏电-充电电流变化曲线。受冲击后  $I_1$  峰值达到了 8.254 A, 大电流瞬间产生局部高温, 使得阴极反应迅速完成, 堵塞导电通道。在  $I_c$  与  $I_1$  初次交汇过后, 电容电压开始上升, 电压上升过程中,  $I_1$  再次突增, 峰值为 0.269 A。这表明首次自愈后, 氧化膜的绝缘性能并没有完全恢复, 在场强不断增大的过程中, 再次发生了击穿, 且击穿程度较第 1 次击穿更低。随后钽电容再次自愈, 在电压上升至 20.002 V 时发生了第 3 次击穿, 与第 2 次击穿电压相比, 第 3 次击穿电压更高, 说明经过第 2 次自愈, 氧化膜的绝缘性能进一步恢复。 $I_1$  在第 3 次下降过程中出现了 II 类变化中  $I_1$  围绕着  $I_c$  上下波动的现象, 时间持续了约 4.50 ms, 随后电压基本恢复至额定电压。这表示第 3 次击穿后, 氧化膜的绝缘性能基本恢复。总体而言, III 类变化涵盖了 I 类变化和 II 类变化的特点, 电压和电流的变化更复杂, 自愈历程更长。

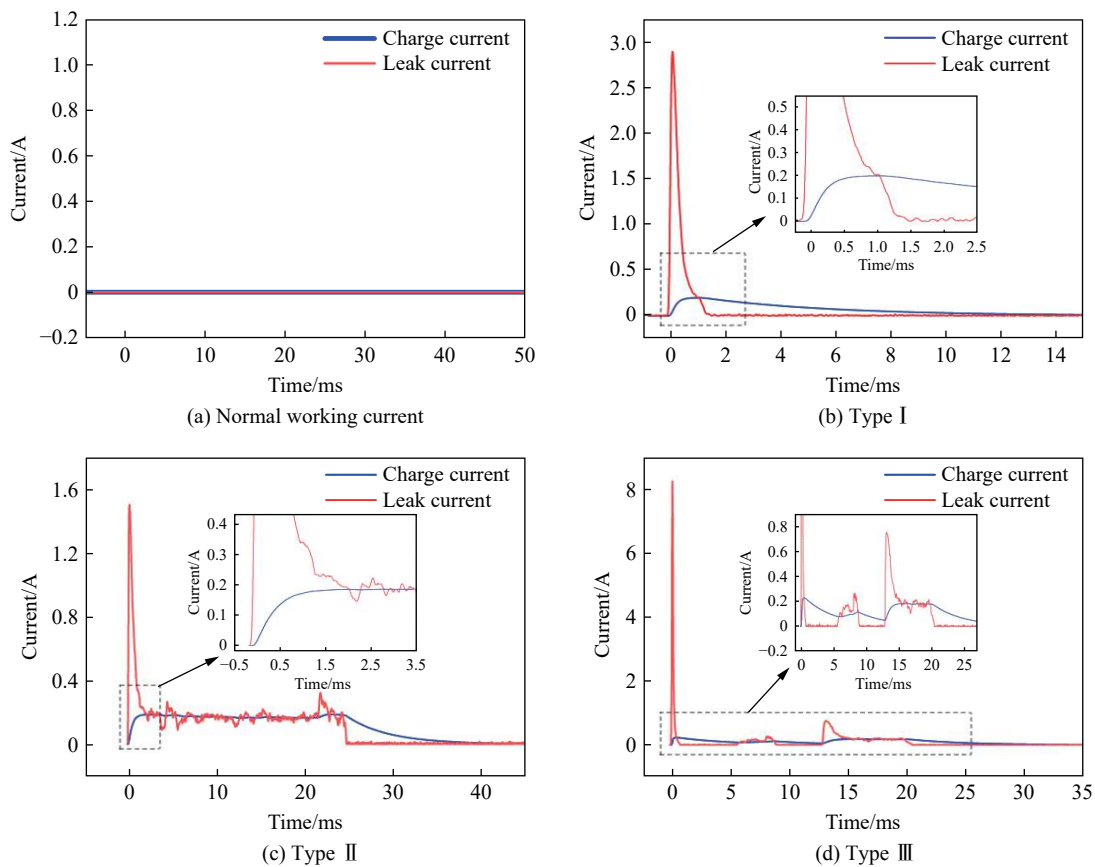


图 6 冲击载荷下漏电-充电电流变化曲线  
Fig. 6 Change curves of leak and charge currents under impact load

不同类型电压变化对应的初始漏电流峰值差别较大。从实验结果中选取 10 条漏电流曲线, 如图 7 所示。其中曲线 A、B、C、D 为 II 类电压变化的漏电流曲线, 曲线 E、F、G、H 为 I 类电压变化的漏电流曲线, 曲线 I 和曲线 J 为 III 类电压变化的漏电流曲线。

对不同类型电压变化的初始漏电流峰值进行统计: I 类电流峰值为 2.5~5 A, II 类电流峰值为 1~2 A, III 类电流峰值在 8~9 A 之间。三者具有明显差别, 表明冲击载荷作用下钽电容的击穿机理是多样的。在 1.00 ms 后 II 类电流以较低水平持续存在, 这是由于 II 类电流峰值较小, 热量积累速率慢, 无法在第一时间完成自愈, 需要后续小电流维持温度缓慢上升, 达到阴极反应温度。而 I 类、III 类电流峰值普遍较高, 均能够短时间内完成自愈。

整体而言, 漏电流曲线峰值越高, 峰宽则越小, 这是由于在流失电荷量相近的情况下, 电荷流失速率越高, 流失时间则越短。从阴极反应的角度来看, 漏电流曲线峰值高表明在击穿区域热量能够快速积累, 使得温度很快达到阴极反应温度, 进而能够快速完成自愈, 因此峰宽更小。

### 3.2 微纳尺度的失效-修复机制

在加载电压远超出额定电压的情况下, 电容器普遍会发生击穿现象, 其中钽电容由于其阴极材料的特殊性, 在局部击穿时能够自愈<sup>[9-10]</sup>。在冲击实验中, 加载电压为额定电压, 钽电容仍出现了击穿现象。为解释这一现象, 将实验中发生击穿的钽电容外壳剥解, 利用扫描电镜观察其内部形貌。

图 8 为钽电容损伤部位的形貌。雷管爆炸后, 冲击波在水介质中传播, 在钽电容表面处, 冲击波发生反射与透射, 透射波转变为应力波在钽芯中传播。钽芯由无数个钽球紧密连接组成, 在应力作用下, 钽球受到其相邻钽球挤压后出现严重变形。氧化膜出现了约 100 nm 宽的裂缝, 在裂缝内部和周围布满了 Mn 的氧化物。不同于其他区域大颗粒状的 Mn 氧化物, 裂缝处的 Mn 氧化物表面更均匀平整, 且有微小空洞, 认为是 Mn 的低价氧化物。

Ta 粉在烧结后表面呈多孔状, 在阳极氧化过程中, 氧化膜难免会出现孔隙和裂缝<sup>[11]</sup>。且 Ta 表面含有杂质时, 阳极氧化后杂质会嵌入到氧化膜之中, 在外电场作用下, 氧化膜中杂质处会出现电应力集中, 使得此处离子容易得到所需活化能, 重新排序, 出现晶态 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>[12]</sup>。而晶态膜介电性能远不如无定形态膜<sup>[13]</sup>。

因此, 钽电容在冲击载荷作用下的电压变化现象可以通过形变导致的裂缝扩展和杂质及周围晶态膜顶破氧化膜来解释。在冲击载荷作用下, 钽球之间相互挤压发生形变, 一方面形变使氧化膜厚度均匀性变差, 另一方面形变产生的应力在氧化膜的微裂缝处集中, 裂缝进一步扩大, 见图 9。

裂缝扩展时, 裂缝处氧化膜不断变薄, 使得此处电场强度不断增大。当电场强度超过击穿场强, 氧化膜导带中因场致发射而存在的电子会在电场作用下不断加速, 电子碰撞晶格时产生电离, 不断的撞击

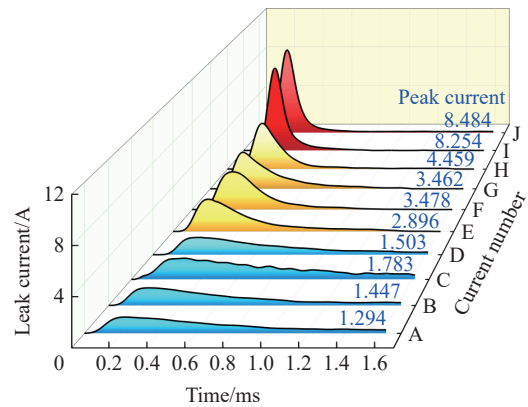


图 7 漏电流时间响应特性曲线

Fig. 7 Leakage current time response characteristic curves

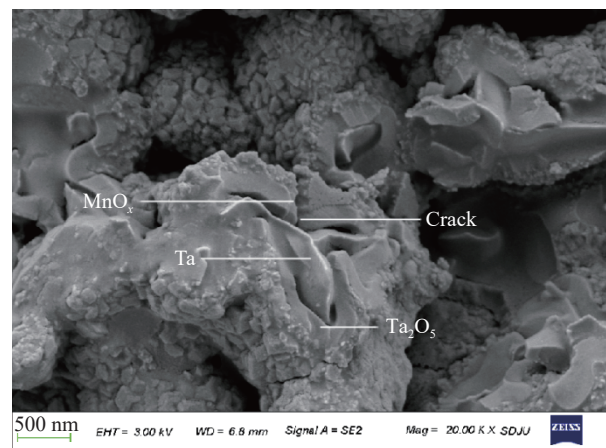


图 8 钽电容损伤部位形貌

Fig. 8 Topography of tantalum capacitor damage site

和电离使得导带中电子不断增加,在氧化膜中形成导电通道<sup>[14]</sup>。宏观表现为电流急剧上升,电容电压迅速下降。大电流产生的局部高温使阴极  $\text{MnO}_2$  反应生成  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ <sup>[15]</sup>,高阻值的  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  堵塞导电通道后电容电压重新开始上升。这种冲击导致裂缝扩展,进而在电场作用下发生击穿的过程对应着 I 类电压变化。

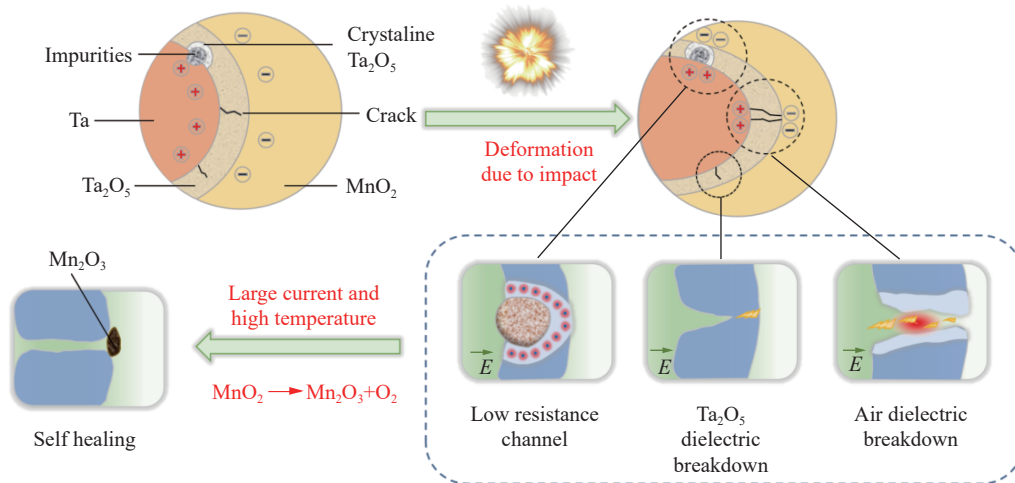


图 9 冲击载荷下钽电容失效-修复机制

Fig. 9 Failure-repair mechanism of tantalum capacitors under impact loads

II 类变化是由于钽球在发生形变后,氧化膜厚度均匀性变差,若氧化膜较薄的区域下方存在杂质和晶态膜,杂质及其周围的晶态膜会顶破无定型膜,使晶态膜或杂质直接与阴极接触,在阴极和阳极之间形成低阻通道。低阻通道内的电流大小取决于晶态膜的阻值,相较于无定型膜击穿时的电离电流,低阻通道的电流更小。电流产生的热量与电流的平方成正比,小电流的热量积累更慢,缺陷区域温度上升也慢,自愈时间较长,因此出现了电压在低电位持续波动的现象。

III 类变化是因为强冲击载荷使裂缝完全贯穿氧化膜,阴极与阳极之间仅间隔几十纳米厚的气体介质。与固体相比,气体的介电强度较小,在强电场作用下易电离。气体介质电离产生的大电流使局部温度快速上升,阴极材料发生反应堵塞导电通道,钽电容快速完成第 1 次自愈。自愈过程中,裂缝中气体介质电离产生的能量以热传导和热辐射的方式向阴极传递,阴极材料表层首先达到反应温度生成  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,随后阴极反应由外向内层层进行。贯穿型裂缝的横截面积较大,完成自愈所需要堵塞的面积更大,大面积的  $\text{MnO}_2$  发生反应时,由于温度分布不均匀和反应释氧,生成的  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  难免存在未反应的  $\text{MnO}_2$  和孔隙。层层  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  中的  $\text{MnO}_2$  或孔隙相连接,形成较大缺陷。因此,当电压再次上升,电场强度增大时,在  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  缺陷处就会发生 2 次甚至多次击穿,直至完全自愈。短时间内同一裂缝处的多次击穿导致热量累积,温度不断上升,使裂缝周围的无定形膜晶化。当晶态膜不断生长,在阳极与阴极之间形成导电通道后,就会出现 II 类变化中的缓慢自愈现象。

这 3 种不同的击穿机制都与钽电容氧化膜本身的瑕疵有关。微裂缝、杂质等瑕疵问题在氧化膜形成过程中难以完全避免,即使同一批次生产的钽电容在微观层面也无法保证相同。因此实验中会出现同一冲击强度下仅有部分钽电容失效和失效类型不同的现象。

## 4 结 论

采用水下爆炸的方法对钽电容进行了不同强度的冲击实验,研究了冲击载荷作用下钽电容的电压变化特性,讨论了钽电容瞬时失效的微观机理,得到了如下主要结论。

(1) 冲击载荷作用下钽电容出现了 3 种类型的电压变化,3 种电压变化均表明钽电容发生了短路失效。随着冲击波超压的增大,钽电容的短路失效概率增大。钽电容发生短路失效的临界超压约为 32 MPa。

(2) I 类电压变化为主要变化类型,在 20 次短路失效中占比 55%,其次是 II 类、III 类电压变化分别



占比35%和10%,其中Ⅲ类电压变化容易在较强冲击载荷作用下出现。3种类型的电压变化对应3种不同的失效过程,分别为击穿后瞬间自愈、击穿后缓慢自愈、多次击穿和自愈。Ⅰ类电压变化的初始漏电流峰值为2.5~5 A,Ⅱ类为1~2 A,Ⅲ类为8~9 A,且峰值越大,峰宽越小。

(3) 钽电容在冲击作用下的微观失效机理与其氧化膜的瑕疵相关,包括氧化膜中微裂缝扩展使得局部电场强度超过击穿场强造成击穿、氧化膜较薄区域下方的杂质及晶态膜突出形成导电通道、贯穿型裂缝形成后气体电离导致的击穿。

## 参考文献:

- [1] 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. DOI:10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.004.  
YANG W, YUE C X, SONG J L, et al. Experimental research on the impact resistance of industrial electronic detonators [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2022(2): 16-19. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.004.
- [2] 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. DOI:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.05.007.  
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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2021.05.007.
- [3] 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. DOI: 10.1109/TDMR.2007.907289.
- [4] 程融,张永录.某型电子干扰弹引信用固体钽电容器失效分析[J].*国防技术基础*,2009(8):28-30.  
CHEN R, ZHANG Y L. Some electronic countermeasure ball blasting fuse uses the solid tantalum capacitor failure analysis [J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2009(8): 28-30.
- [5] 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. DOI:10.11883/bzycj-2016-0222.  
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. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0222.
- [6] 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(S2):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(S2): 16-22.
- [7] 贾丰州,牛少华,孙远程,等.冲击载荷作用下的固体钽电容力-电响应特性[J].*探测与控制学报*,2022,44(5):20-25.  
JIA F Z, NIU S H, SUN Y C, et al. Solid tantalum capacitance force-electrical response characteristics of impact load [J]. *Journal of Detection and Control*, 2022, 44(5): 20-25.
- [8] COLE R H. *Underwater explosions*[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948.
- [9] TEVEROVSKY A. Breakdown and self-healing in tantalum capacitors [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, 28(2): 663-671. DOI: 10.1109/TDEI.2020.009240.
- [10] 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. DOI: 10.1109/TDEI.2009.5211867.
- [11] VERMILYEA D A. The effect of metal surface condition on the anodic oxidation of tantalum [J]. *Acta Metallurgica*, 1954, 2(3): 476-481. DOI: 10.1016/0001-6160(54)90069-3.
- [12] 潘齐凤.片式钽电容器浪涌电流失效研究[D].成都:电子科技大学,2012.
- [13] EZHILVALAVAN S, TSENG T Y. Conduction mechanisms in amorphous and crystalline Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(9): 4797-4801. DOI: 10.1063/1.367272.
- [14] MIYAIRI K. Electrical breakdown and electroluminescence in tantalum pentoxide films [C]//Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Ottawa, ON, Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002. DOI: 10.1109/CEIDP.1988.26332.
- [15] JACOB K T, KUMAR A, RAJITHA G, et al. Thermodynamic data for Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MnO<sub>2</sub> [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2012, 30(4): 459-472. DOI: 10.1515/HTMP.2011.069.

(责任编辑 张凌云)