DOI: 10.11883/bzycj-2016-0222 文章编号:1001-1455(2018)02-0419-07

高冲击下引信用固态钽电容的参数变化*

李长龙,高世桥,牛少华,刘海鹏
(北京理工大学机电学院,北京 100081)

摘要:通过实验研究分析了高冲击载荷对固态钽电容器电容量、漏电流等电参数的影响。结果显示,钽电容电参数随着冲击载荷的升高,电容量增大,同时漏电流呈指数型升高。冲击过后,钽电容电参数可恢复至原来的量级。冲击载荷引起钽电容电参数变化的机理为:冲击引起的钽电容的弹性变形使电容量增大,冲击引起的介质层 Ta_2O_5 中的微裂缝以及冲击引发的介质层中陷阱浓度的增大使漏电流升高。

关键词:高冲击载荷;固态钽电容;电容量;漏电流
中图分类号:TM535 **国标学科代码**:1301575 **文献标志码**:A

智能引信通常用于判断战斗部最佳起爆位置、最优起爆时机以及确保能够安全引爆战斗部,而钽电容在智能引信中起着贮能、点火、解耦、延时等作用。因此,钽电容的质量对智能引信的起爆控制系统起着决定性的作用。当炮弹发射时,会产生突发性高机械冲击载荷,钽电容经受高冲击载荷作用时会发生特性变化。钽电容在高冲击载荷下的参数变化特性是决定智能引信实现其功能的关键因素之一。

针对钽电容在环境载荷下的参数变化特性已做了许多研究。徐建军研究了钽电容在高温下的漏电流变化现象[1],Alexander 研究了钽电容在机械振动、反偏电压作用下的电参数变化特性[2-3],程融发现钽电容在冲击应力下易出现瞬时短路的现象[4],何荣华等对高过载下军用电容的失效进行了探讨,并分析了电容失效对引信的影响[5]。

虽然关于钽电容的参数变化问题已做了大量研究,但有关参数变化的影响因素主要集中在振动、温度等环境载荷方面,而针对冲击载荷对钽电容影响的研究比较少。即使有关于钽电容经受冲击载荷作用的研究也主要集中在实验现象上,而缺少对引起参数变化的内部机理的分析。本研究首先通过实验手段分析了钽电容在冲击载荷作用下电容量、漏电流的变化特性,然后对电参数变化特性分析其内在机理。

1 实验设计

1.1 钽电容结构

固态钽电容主要包括阳极 Ta、电介质 Ta_2O_5、阴极 MnO_2。阳极 Ta 是由钽粉压制烧结而成,因此具有多孔性,有助于增大内部接触面积,提高电容容值。Ta_2O_5 介质通过阳极氧化,形成于阳极 Ta 的外表面。将钽棒浸入锰盐溶液中并热分解,形成阴极 MnO_2。钽电容的结构如图 1 所示。

1.2 钽电容实验测试

钽电容用于智能引信中,需要经受瞬间强冲击载荷的作用,在冲击载荷作用下钽电容性能的变化为其电容量和漏电电流的变化。马歇特锤试验装置能够产生瞬态冲击载荷,载荷范围在 0～50 000 g 之间,能够在试验中模拟钽电容的实际使用工况。因此,使用马歇特锤击设备测试钽电容的电容量和漏电流。实验过程中,选取 4 种不同类型的钽电容进行测试,将被测钽电容焊接在电路板上,电路板采用螺纹连接与击锤固定在一起。击锤安装于固定在偏心轮的锤杆上。实验时使用偏心轮将击锤升至一定高度,用卡齿固定。卡齿放开后,依靠偏心轮下方的重锤作为动力,击锤击打在铁锭上产生冲击载荷。使

* 收稿日期:2016-07-27;修回日期:2016-12-05
基金项目:国家自然科学基金项目(11372045)
第一作者:李长龙(1989—),男,博士研究生;通信作者:牛少华,shh@bit.edu.cn。

用压电式加速度计实时记录冲击过载值。使用漏电流测试仪(Keithley 6487 Picoammeter)监测钽电容漏电流随冲击作用的变化,动态信号分析仪记录皮安表输出。使用阻抗分析仪(Agilent 4294A)记录电容量的变化。传感器型号为 PCB 350B21,灵敏度为 0.05 mV/g,量程为±100 000 g。在电容充电 5 min后进行实验,实验过程中,采用步进冲击方法,逐步增大冲击 g 值,观察钽电容电参数的变化。实验系统如图 2 所示。钽电容参数及测量范围如表 1 所示。

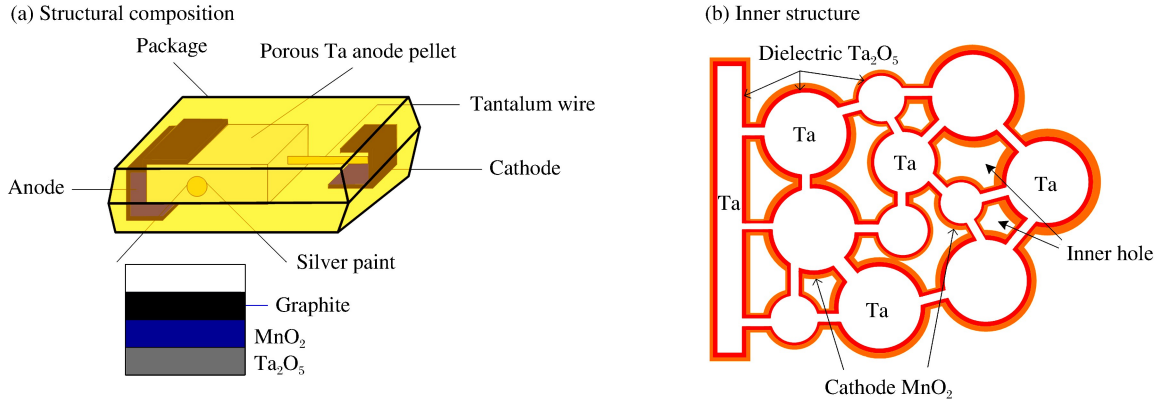


图 1 钽电容结构示意图

Fig. 1 Structure of tantalum capacitor

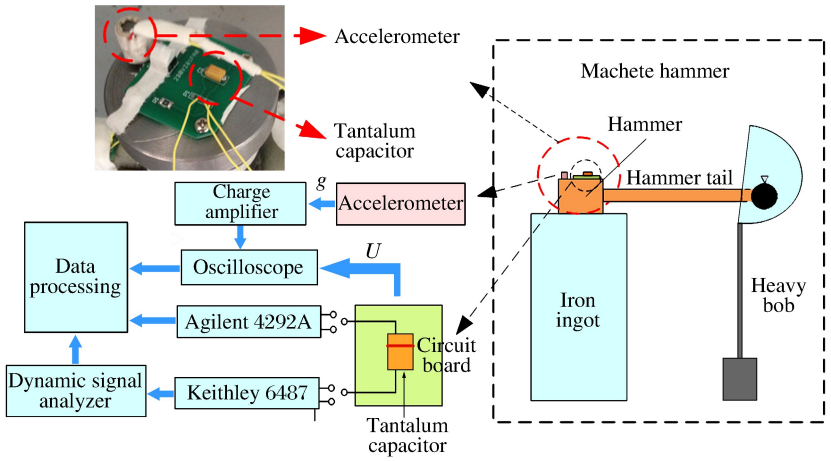


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Experimental setup

表 1 钽电容参数及测量范围

Table 1 Tantalum capacitors and sensor

电容	型号	数量	电容量			漏电流		
			测量范围/μF	测量精度/μF	误差/%	测量范围/mA	测量精度/mA	误差/%
16 V22 μF	16K226	5	0～47	±0.01	99.98～100.02	0～2	±0.01	99.5～100.5
16 V47 μF	16K476	5						
25 V22 μF	25K226	5						
25 V47 μF	25K476	5						

2 实验结果

图 3 为钽电容的额定电容随冲击载荷变化的情况。从实验结果发现,电容量随冲击载荷的变化而发生变化。对于 16 V22 μF 钽电容,在施加 1 000 g 冲击后,电容量有 0.1 μF 的升高;持续增加冲击载荷,在 3 000 g时电容量增加 0.15 μF;当冲击值达到 10 000 g 时,电容量升高 0.4 μF。对于 16 V47 μF 钽电容,在

施加 1 000 g 冲击后，电容量有 0.15 μF 的升高；在 3 000 g 时电容量增加 0.2 μF；当冲击值达到 10 000 g 时，电容量升高 0.45 μF。对于 25 V22 μF 钽电容，与冲击载荷对应的电容量变化为 0.12、0.17 和 0.45 μF；对于 25 V47 μF，电容量对应的变化为 0.13、0.19 和 0.50 μF。冲击完成后，电容量恢复至原来的额定值。

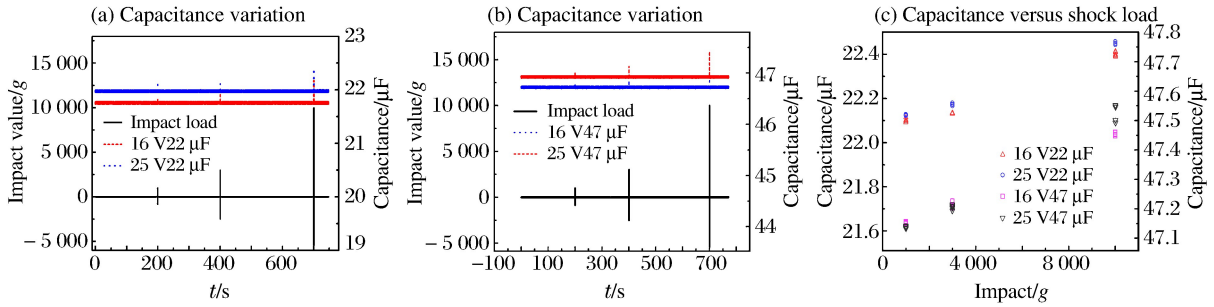


图 3　冲击钽电容容量的影响

Fig. 3　Effect of shock load on capacitance

图 4 为漏电流随冲击载荷的变化情况。电容接通电源后，涌入的电流为充电电流，充电电流开始很大，随着时间延长(≥5 min)而下降稳定在远小于额定电流的特定值，此时的电流为漏电流。实验过程中，冲击值从 1 000 g 开始逐渐增加。从实验结果发现，漏电流变化趋势与冲击载荷变化相一致。对于 16 V22 μF 电容施加 1 000 g 的冲击后，漏电流增加一个数量级，当冲击值增加到 3 000 g 时，漏电流约为 0.15 mA，随着冲击值的增大，漏电流逐渐增加。当冲击值达到 10 000 g 时，漏电流达到 0.25 mA。对于 16 V47 μF 电容，施加 1 000 g 的冲击后，漏电流达到 0.28 mA，当冲击值增加到 3 000 g 时，漏电流约为 0.4 mA，当冲击值达到 10 000 g 时，电容漏电流达到 0.6 mA。对 25 V22 μF 电容施加 1 000 g的冲击后，漏电流约为 0.13 mA，当冲击值增加到 3 000 g 时，漏电流约为 0.44 mA，当冲击值达到 10 000 g 时，漏电流达到 0.9 mA。对于 25 V47 μF 电容，施加 1 000 g 的冲击后，漏电流达到 0.4 mA，当冲击值增加到 3 000 g 时，漏电流约为 0.6 mA，当冲击值达到 10 000 g 时，电容漏电流达到 1.7 mA。

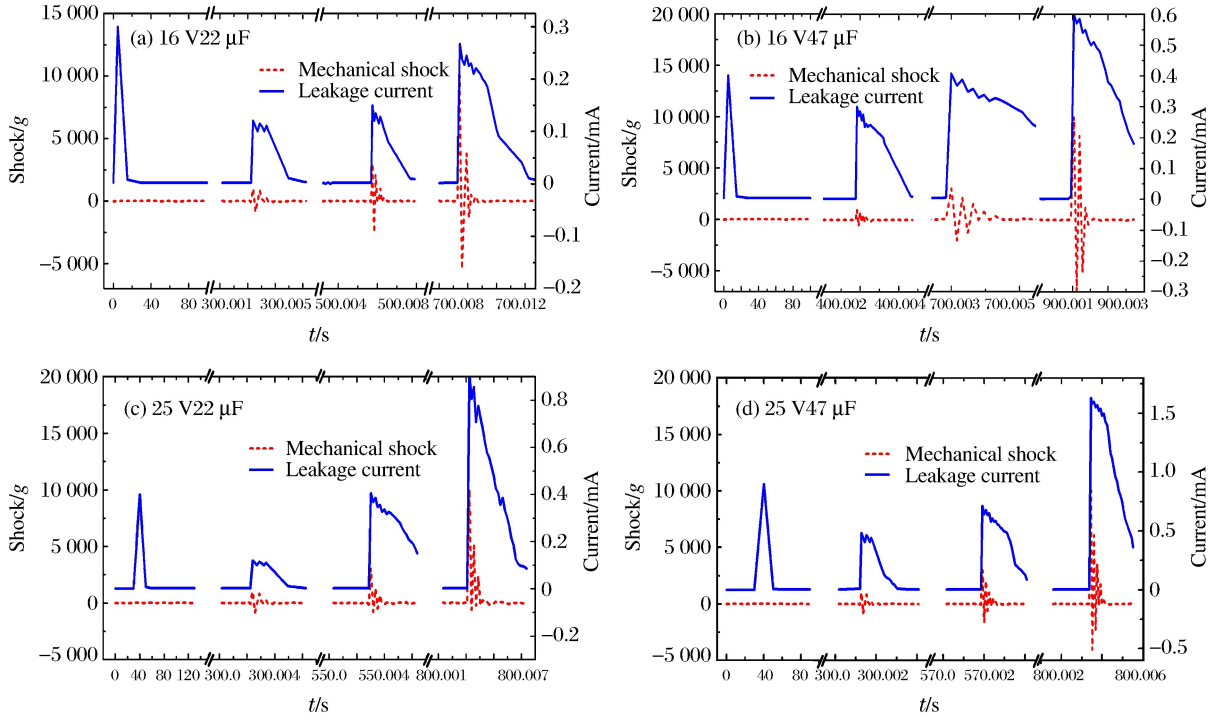


图 4　不同电容漏电流与冲击载荷关系

Fig. 4　Relationship between leakage currents and shock loads of different capacitors

如图 4 所示，当冲击载荷结束后，4 组钽电容的漏电流经过一段时间后恢复到原始水平。即使漏电流达到很高的量级，在钽电容未被击穿时，冲击过后，漏电流依然能恢复到原来的水平。这种特性称为钽电容的自愈特性。

智能引信能够引爆战斗部，要求钽电容中存储的能量必须大于电雷管的安全起爆能量。由于钽电容在冲击载荷作用下漏电流增大，则电容中储存的能量以漏电流的形式出现损耗。当钽电容剩余的能量大于电雷管需要的发火能量时，才能可靠引爆电雷管，可靠实现智能引信的功能。

图 5 为引信点火电路[6]，其中电雷管起爆所满足的条件为：

$$CU^2/2-[U(t)I_{\mathrm{lea}}t_{\mathrm{b}}+w_{\mathrm{other}}]\geqslant I_{\mathrm{f}}^2R_{\mathrm{d}}t_{\mathrm{b}} \tag{1}$$

电容充满电后存储的总能量为 $CU^2/2$，电雷管爆炸所需要的能量为 $I_{\mathrm{f}}^2R_{\mathrm{d}}t_{\mathrm{b}}$，$I_{\mathrm{f}}=0.45$ A 为最小发火电流，R_{d} 为电雷管阻抗，t_{b} 为点火时间。$U(t)I_{\mathrm{lea}}t_{\mathrm{b}}+w_{\mathrm{other}}$ 为漏电流和其他元件损耗的能量，$U(t)$ 为电压变化值。为使电雷管能够引爆，4 种电容允许的最大漏电流为 1.1、2.4、3.5 和 7.3 mA。

针对钽电容允许的最大漏电流，继续加大冲击应力，得出与钽电容对应的临界失效冲击载荷，如图 6所示。

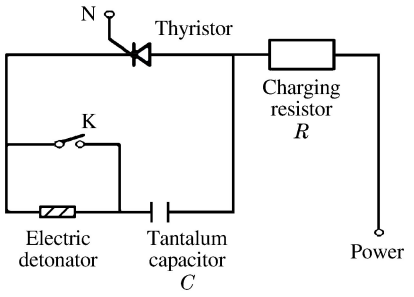


图 5 引信点火电路

Fig. 5 Fuse ignition circuit

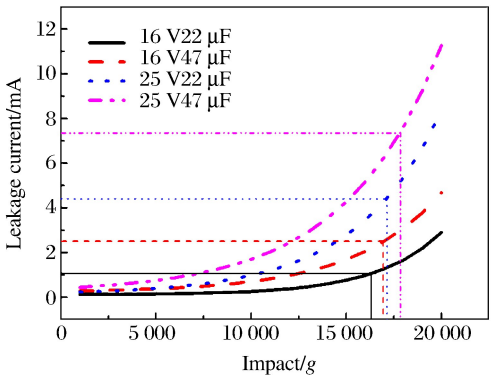


图 6 临界失效冲击载荷

Fig. 6 Critical failure shock load

由图 6 可知，钽电容漏电流在冲击载荷作用下呈指数型升高。钽电容临界失效载荷及钽电容漏电流在冲击载荷下的变化模型如表 2 所示。

表 2 漏电流-冲击模型

Table 2 Numerical model of leakage current-shock load

电容	漏电流-冲击模型	最大漏电流/mA	临界冲击载荷/($10^4 g$)
16 V22 μF	$I=A_1+A_2\exp(\alpha g)$ $A_1=1.09\times10^{-4}$，$A_2=8.17\times10^{-6}$，$\alpha=3\,429$	1.1	1.65
16 V47 μF	$I=B_1+B_2\exp(\beta g)$ $B_1=2.14\times10^{-4}$，$B_2=5.28\times10^{-5}$，$\beta=4\,506$	2.4	1.72
25 V22 μF	$I=C_1+C_2\exp(\gamma g)$ $C_1=1.17\times10^{-4}$，$C_2=8.98\times10^{-5}$，$\gamma=4\,427$	3.5	1.74
25 V47 μF	$I=D_1+D_2\exp(\lambda g)$ $D_1=2.14\times10^{-4}$，$D_2=5.28\times10^{-5}$，$\lambda=4\,506$	7.3	1.85

3 电参数变化机理分析

由实验结果可知，冲击会引起钽电容电参数的变化：电容量的升高及漏电流随冲击载荷的升高呈指数型升高。分析钽电容电参数变化，可得冲击载荷对钽电容的作用机理为：弹性变形范围内，冲击引发的钽电容变形导致电容的变化；冲击引起介质层微裂缝以及冲击引起陷阱能级的升高导致漏电流增大。

3.1 冲击引起的钽电容变形

由于钽电容是由钽颗粒压制烧结而成，因此钽电容可以看做多个钽颗粒电容的并联。图 7 为单个钽颗粒模型。钽电容在受到冲击载荷作用时，赋能颗粒发生变形，在弹性变形范围内，由球形颗粒变形为椭球形颗粒，然后恢复原状。

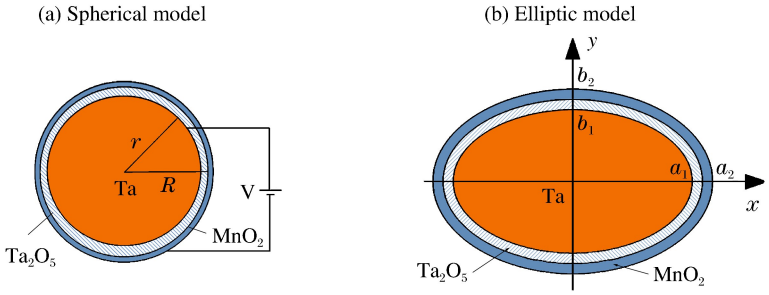


图 7　钽颗粒电容模型

Fig. 7　Tantalum particles capacitor's models

图 7(a)所示的球形电容的电容量为：

$$C_s = 4\pi\varepsilon Rr/(R-r) \tag{2}$$

式中：ε 为介电常数，F/m；R 为 Ta_2O_5 外径，mm；r 为 Ta 半径，mm。图 7(b)所示椭球型电容的电容量为[7]：

$$C_e = \frac{Q}{U} = 16\pi\varepsilon r\sqrt{R/w}\Big/\left(\arctan\frac{R-w}{2r\sqrt{R/w}} - \arctan\frac{r-rw/R}{2r\sqrt{R/w}}\right) \tag{3}$$

式中：Q 为电荷量，C；U 为内外极板之间的电压，V；w 为变形量，mm。

在冲击过程中，电容的变化量为：

$$\Delta C = C_e - C_s = 4\pi\varepsilon\left\{4r\sqrt{R/w}\Big/\left(\arctan\frac{R-w}{2r\sqrt{R/w}} - \arctan\frac{r-rw/R}{2r\sqrt{R/w}}\right) - Rr/(R-r)\right\} \tag{4}$$

冲击作用下球形颗粒的变形见图 8。根据赫兹接触理论得，在力 $F(t)$ 作用下，在弹性变形范围内，两球心 O_1、O_2 相互接近的距离为：

$$\delta^3 = \frac{9}{16}\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1^2} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2^2}\right)F^2(t) \tag{5}$$

式中：R_1、R_2 为两球的半径，μ_1、μ_2、E_1 和 E_2 分别为泊松比及弹性模量，GPa。

则电容球形颗粒在受到冲击作用时，球心相互接近的距离为：

$$\delta^3 = 9F^2(t)(1-\mu^2)/(4RE^2) \tag{6}$$

则单个球形颗粒变形量为：

$$\delta = \frac{1}{2}\sqrt[3]{9F^2(t)(1-\mu^2)/(4RE^2)} \tag{7}$$

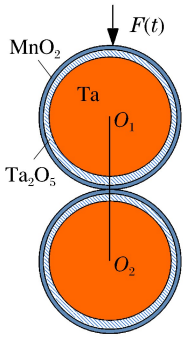


图 8　冲击作用下两球接触模型

Fig. 8　Two spherical capacitors' contact model under high-g shock

在冲击作用下，电容值的变化量为：

$$\begin{cases}\Delta C = C_s - C_e = 4\pi\varepsilon\left[Rr/(R-r) - 4r\sqrt{R/w}\Big/\left(\arctan\dfrac{R-w}{2r\sqrt{R/w}} - \arctan\dfrac{r-rw/R}{2r\sqrt{R/w}}\right)\right] \\ w = \dfrac{1}{2}\sqrt[3]{\dfrac{9F^2(t)}{4}\left(\dfrac{1-\mu^2}{RE^2}\right)}\end{cases} \tag{8}$$

图 9 为钽颗粒电容随冲击载荷的变化。

假设钽电容由半径均匀一致的球体钽颗粒电容组成，则每个钽电容所包含的球形电容的数量 N 为：

$$N = V/\sum V_i \tag{9}$$

式中：V 为未封装的钽电容体积，V_i 为 Ta、Ta_2O_5、MnO_2 的体积。不同类型钽电容包含球形钽颗粒电容的数量及电容变化值如表 3 所示，图 10 为不同类型电容与冲击载荷的关系。

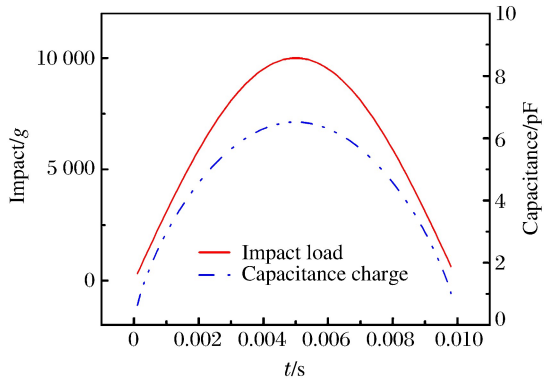


图 9 钽颗粒电容随冲击的变化

Fig. 9 Capacitance varying with shock load

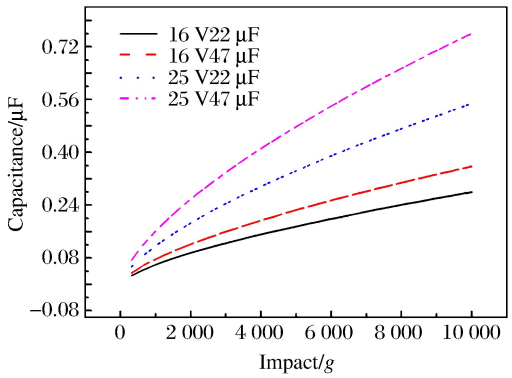


图 10 电容变化量与冲击的关系

Fig. 10 Capacitance variation versus shock load

表 3 冲击载荷下钽电容容量的改变量

Table 3 Capacitance variation for different capacitors

电容	体积/mm³	数量/10⁵	电容变化/μF		
			1 000 *g*	3 000 *g*	10 000 *g*
16 V22 μF	2.5×2.0×1.5	1.07	0.06	0.12	0.24
16 V47 μF	4.0×3.0×0.8	1.37	0.08	0.16	0.36
25 V22 μF	3.5×2.8×1.5	2.10	0.12	0.24	0.46
25 V47 μF	4.0×3.0×1.7	2.92	0.18	0.32	0.76

由表 3 可知，计算值与实验值存在偏差。分析可知造成数值偏差的原因为：由于加工钽电容时，在外层添加石墨和银层，而在计算时，忽略石墨和银层，造成数值出现偏差；钽电容变形时，不仅在纵向出现变形，横向同样存在微小形变，计算时未考虑横向变形因素。

3.2 冲击引起的漏电流变化

冲击引起的漏电流变化是由两种机制决定的：介质层在冲击下产生微裂缝；冲击下电子陷阱的产生，Ta—O 化合键的断裂以及氧气空穴的产生。陷阱浓度的增加使参与导电的电子增多，漏电流从而增大。

实验中发现，在钽电容未被击穿时，冲击过后，漏电流依然能恢复到原来的水平。这种现象可由钽电容的自愈机理解释。在冲击载荷作用下，钽电容介质层产生“薄弱”区，使该区域漏电流增大。持续增大的电流使局域温度升高，当温度达到 400 ℃时，导电性良好的 MnO_2 转变为导电性能差的 Mn_2O_3，覆盖到缺陷区域上，使“薄弱”区域处的漏电流恢复至原来的量级。

4 结 论

利用马歇特落锤实验对固体钽电容进行高过载测试，从测试结果发现，冲击载荷对固体钽电容电参数的影响主要表现为电容量的升高以及漏电流的增大。电容量随着冲击载荷的增加而增加，钽电容漏电流随冲击载荷的升高呈指数型升高，冲击过后，电容量恢复额定容值，经过一段时间，钽电容漏电流同样恢复至原来的量级。同时，分析钽电容电参数变化原因，得出引起钽电容电参数变化的机制为：冲击引起的钽电容的弹性变形使电容量增大，冲击引起的介质层 Ta_2O_5 中的微裂缝以及冲击引发的介质层陷阱浓度的变化。钽电容球形模型在冲击载荷作用下发生弹性变形，使电容量发生改变。在冲击载荷的作用下，介质层缺陷处容易引发微裂缝，形成导电微沟道，使漏电流增大。另外，由于冲击载荷的作用使介质层中化合键产生断裂导致电子传导机制中参与导电的电子增多，同时由于氧空穴在 Ta_2O_5 和 MnO_2 界面处的积累，使界面产生极化，界面势垒降低进而导致注入的电子数量增多，电流密度增大，漏电流升高。

参考文献：

[1] 徐建军. 高冲击高温下电引信关键元器件可靠性测试[J]. 弹箭与制导学报，2011，31(1)：151-152.
XU Jianjun. Reliability test of key components of electric fuze subjected to high impact and high temperature[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011,31(1):151-152.

[2] 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.

[3] TEVEROVSKY A. Effect of reverse bias stress on leakage currents and breakdown voltages of solid tantalum capacitors[R]. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center, 2011.

[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.
CHENG Rong, ZHANG Yonglu. Failure analysis of solid tantalum capacitors used for electronic jamming bombs fuse[J]. Technology Foundation of National Defence, 2009(8):28-30.

[5] 何荣华，张亚，李波，等. 高过载下军用电容的参数变化研究及失效分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验，2010，28(1)：24-26.
HE Ronghua, ZHANG Ya, LI Bo, et al. Parametric variation and failure analysis of military capacitors under high overload[J]. Electronic Product Reliability & Environmental Testing, 2010,28(1):24-26.

[6] 景义林. 旋转椭球形电容器的电容与静电能[J]. 大学物理，2011，30(10)：25-27.
JING Yilin. The capacitance and electrostatic energy of a revolving ellipsoidal capacitor[J]. College Physics, 2011, 30(10):25-27.

[7] CHIU F C. A review on conduction mechanisms in dielectric films[J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2014,2014(7):1-18.

Parameters variation of solid tantalum capacitors used in fuze under high-*g* shock

LI Changlong, GAO Shiqiao, NIU Shaohua, LIU Haipeng

(*School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: A series of experiments were carried out to explore the effects of high-*g* shock load on the electrical parameters (capacitance and leakage current) of the solid tantalum capacitor. The results show that the capacitance increases with the increase of the shock load and the leakage current increases exponentially with the rising shock load. After the shock load, the electrical parameters return to their initial values as demonstrated. The variations of the tantalum capacitors' electrical parameters were explained by a combination of three mechanisms: the shock-induced elastic deformation of the tantalum capacitor that leads to the capacitance's increase, the shock-induced micro-defects and shock-induced rise of the electron traps concentration that leads to the leakage currents' increase.

Keywords: high-*g* shock load; solid tantalum capacitor; capacitance; leakage current

（责任编辑　毛大胜）