

金属化聚丙烯膜脉冲电容器过载特性*

张天洋¹, 宋祖殷², 袁云华², 秦舒², 陈冬群¹, 刘金亮¹

(1. 国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 空军驻湖南地区军事代表室, 湖南长沙 410100)

摘要:脉冲电容器作为爆磁压缩激励电流源的储能元件之一,通常要求单次可靠运行。正是由于单次运行,为脉冲电容器的过载工作提供了极大的可能。过载工作的电容器与额定电容器相比具有体积小、重量轻的优点,可实现爆磁压缩激励电流源的紧凑化。研究了不同温度下国产金属化聚丙烯膜脉冲电容器的过载特性,如过载运行的储能密度,放电电流及可靠度等。实验表明:在 $-45^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内过载运行这种电容器,其储能密度可达额定储能密度的1.8倍,同时在0.95的置信水平下,其过载运行的可靠度单侧置信下限为0.9,可以实现稳定可靠运行。

关键词:金属化聚丙烯膜脉冲电容器;过载特性;单次放电

中图分类号:TM533 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)02-005-04

Overstress characteristics of metalized polypropylene pulse capacitor

ZHANG Tianyang¹, SONG Zuyin², YUAN Yunhua², QIN Shu², CHEN Dongqun¹, LIU Jinliang¹

(1. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Air Force Military Representative Office in Hunan, Changsha 410100, China)

Abstract: As one of the energy storing elements of explosively-driven flux compression generators, the pulsed capacitor was required to discharge only once, such as explosively-driven flux compression generators. Therefore, it provided a possibility to make the pulsed capacitor working in overstress. Compared with the overstressing capacitor, the pulsed capacitor has several advantages, such as small volume and light weight. So it could be used as a current driver to miniaturize explosively-driven flux compression generators. The overstress characteristics of metalized polypropylene pulse capacitor (MPP capacitor) were investigated at different temperatures. Experimental results show that the energy storage density is 1.8 times of the rated energy storage density at the temperature of $-45 \sim 60^{\circ}\text{C}$, and in this condition, the one-side lower confidence limit of reliability is 0.9 if the confidence level is 0.95.

Key words: metalized polypropylene pulse capacitor; overstressing characteristics; single discharge

脉冲电容器作为爆磁压缩激励电流源的储能元件之一,是爆磁压缩发生器^[1](Magnetic Flux Compression Generators, MFCGs)的一个关键部件,通常要求单次可靠运行。正是由于单次运行,为脉冲电容器的过载工作提供了极大的可能。过载工作的电容器与额定电容器相比具有体积小、重量轻的优点,可实现爆磁压缩激励电流源的紧凑化。

近十年以来,美国德克萨斯大学脉冲功率中心对商业提供的电子元器件在脉冲功率领域的过载运行问题进行了大量研究,比如电池的大电流放电^[2]、电阻的超功率使用^[3]、电容器的过电压使用^[4]等。本文研究了不同温度下国产金属化聚丙烯膜脉冲(Metalized Polypropylene Pulse,

MPP)电容器的过载特性。

1 实验装置

MPP电容器过载放电实验的实验装置如图1所示,图中AC为220V交流电源,其作用是提供稳定的交流电压,并通过变压器升压后经高压硅堆D对电容器C直流充电。R为20k Ω 的水电阻,在电容器充电过程中起到限流的作用,同时在电容器击穿时保护充电回路,防止电容器击穿产生的大电流损坏充电回路。GAP为触发型气体火花开关,其作用是控制电容器C对负载电路放电。L为0.48 μH 负载,这个负载值相对较小,其目的是保证电容器有较大的输出电流, R_m 为负载电感的内阻。

* 收稿日期:2015-01-06

基金项目:国家高技术发展基金资助项目(51477177)

作者简介:张天洋(1986—),男,吉林图们人,博士研究生,E-mail:zhang_tianyang@126.com;

陈冬群(通信作者),男,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:csycdq@163.com

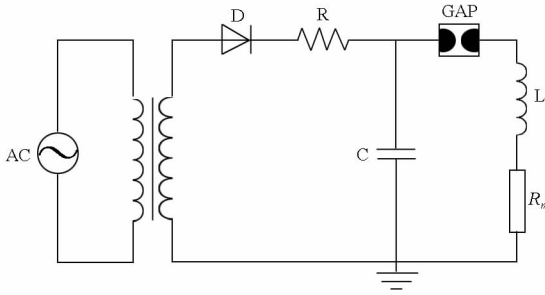


图 1 实验平台电路示意图

Fig. 1 Schematic of experimental facility

C 为样本电容器（型号：MMJ4 - 6.6），由兰州长华科技发展有限公司生产，其具体参数如下：电容量 $6.6\mu\text{F}$ ，额定电压 4kV ，体积 135cm^3 ，重量 0.2kg ，额定储能密度 0.4kJ/L 。实验前对电容器进行编号（ $0 \sim 50$ ）。由于实验中要对不同温度下的电容器进行测试，因此需要在电容器内部安装一个温度探测装置。为了不影响电容器的各项性能，根据 MPP 电容器为卷绕型的特点，将温度探测装置置于卷绕支撑物内部，并将电容器两端喷金层区域用导线引出，最后在端口两端灌胶密封。

在电容器过载放电实验前，需要测试电容器的耐压性能。首先从样本电容器中抽取 $0 \sim 23$ 号电容器，并平均分成三组，每组 8 个电容器。其次在三个温度点（ -45°C 、 25°C 、 60°C ）分别对三组电容器的耐压性能进行测试，其中低温实验（ -45°C ）和高温实验（ 60°C ）分别在高低温箱中进行。实验利用图 1 中的充电回路对电容器充过电压，直到电容器出现击穿放电损坏现象为止。由于击穿时电容器相当于短路，其两端电压很小，因此可以通过测量电容器两端电压的变化情况来

判断其是否击穿，从而得到这种电容器的击穿电压值，最后分析实验数据得到不同温度下电容器的耐压值 U_0 。

电容器过载放电测试中，首先从样本电容器中抽取 $24 \sim 50$ 号电容器，并平均分成三组，每组 9 个电容器。其次在三个温度点（ -45°C 、 25°C 、 60°C ）分别对三组电容器的过载放电能力进行测试。实验利用图 1 中的充电回路将电容器充到 U_0 后，触发开关 GAP 导通，使电容器经放电回路对 $0.48\mu\text{H}$ 负载 L 放电。

实验中要对电容器的温度、充电电压、放电电流以及电容器自身参数等进行测量，其中温度利用 PT100 热电偶温度探头及监控器进行测量，其精度为 1°C ，可实时监测。充电电压利用 SDW - FRC 交直流分压器进行测量，其为阻容分压器，分压比为 $1000:1$ ，高压臂阻抗为 $1000\text{M}\Omega$ ，直流精度为 1.0% ，可实时监测。放电电流利用美国 Pearson 公司生产的 Rogowski 线圈进行测量，其为自积分线圈，测量灵敏度为 1V/kA ， $I/U = 1000$ ，即被测电流经 Rogowski 线圈转换成电压信号，且两者成正比，比值为 1000 。电容器自身参数利用 TH2822A 手持式 LCR 仪进行测量。

2 实验结果及分析

2.1 电容器耐压性能实验

电容器耐压性能的实验测试结果如表 1 所示，表中给出了三个温度条件下各个电容器的击穿电压值，其中括号内数字为电容器编号，括号外数字为电容器的击穿电压值。

表 1 电容器耐压性能实验结果

Tab. 1 Results of capacitor withstand voltage experiment

温度 ($^\circ\text{C}$)	耐压值 (kV)								
-45	(0#)5.8	(1#)5.9	(2#)6.0	(3#)6.0	(4#)6.1	(5#)5.7	(6#)6.3	(7#)5.7	
25	(8#)5.9	(9#)5.8	(10#)5.9	(11#)5.8	(12#)6.1	(13#)6.0	(14#)5.7	(15#)5.9	
60	(16#)5.5	(17#)5.3	(18#)5.6	(19#)5.5	(20#)5.5	(21#)5.3	(22#)5.3	(23#)5.6	

实验结果表明：

1) 在 60°C 时电容器的击穿电压值普遍低于 25°C 和 -45°C 时的击穿电压值，这说明温度对于 MPP 电容器的击穿电压是有影响的，其存在一段最适宜的工作温度范围，超过这一温度范围时电容器的耐压性能有所下降。这是由于过高的温度会使电容器绝缘介质的绝缘强度下降从而出现热老化或热击穿的现象^[5]。根据实验数据可以确定 $-45 \sim 25^\circ\text{C}$ 这个温度范围内是适合 MPP 电容

器正常工作的。

2) 在同一温度环境下，各个电容器的击穿电压值不尽相同，存在一定的偏差，但差别不大。这说明在一定温度环境下，MPP 电容器存在一个耐压值，当充电电压高于这个耐压值时，电容器有可能发生击穿。根据实验数据可以定义三个温度下测得的击穿电压的最小值即为这种电容器在该温度环境下的耐压值。也就是说 -45°C 和 25°C 下，电容器的耐压值为 5.7kV 。 60°C 下，电容器的耐

压值为 5.3kV。

为了分析不同温度下电容器过载运行对其储能密度的提高程度,可根据式(1)进行计算。

$$\frac{W_0}{W_e} = \frac{\frac{C_0 U_0^2}{2V_0}}{\frac{C_e U_e^2}{2V_e}} \approx \frac{C_0 U_0^2}{C_e U_e^2} \quad (1)$$

其中 W_0, C_0, U_0, V_0 分别为电容器过电压下的储能密度,电容量,充电电压和电容器体积; W_e, C_e, U_e, V_e 分别为电容器额定电压下的对应参数。由于在 $-45 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内电容器的体积基本不变,因此式(1)可作上述简化。

根据式(1)计算得, -45°C 和 25°C 环境下,电

容器过载运行的储能密度可达到额定储能密度的 2 倍。 60°C 环境下,电容器过载运行的储能密度可达到额定储能密度的 1.8 倍。这表明在 $-45 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内用过载运行的 MPP 电容器作为爆磁压缩激励电流源的储能元件,其体积和重量相对额定工作的 MPP 电容器能够缩小 55% 以上。

2.2 电容器过载放电实验

电容器过载放电实验的结果如表 2 所示,表中给出了三个温度条件下各个电容器的放电次数 (n)、电容量变化率 ($\Delta C/C$)、充电电压 (U_0)、放电电流第一峰值 (I_m) 以及放电电流第一峰值对应时间 (t_m)。

表 2 电容器过载放电实验结果

Tab. 2 Results of capacitor overstress discharge experiment

温度 ($^\circ\text{C}$)	No.	n	$\Delta C/C$ (%)	U_0 (kV)	I_m (kA)	t_m (μs)
-45	24	11	0.25	5.7	18.2 ~ 18.6	3.1 ~ 3.2
	25	10	0.96	5.7	18.4 ~ 19	3 ~ 3.2
	26	10	0.22	5.7	18.4 ~ 18.8	3
	27	10	0.40	5.7	17.2 ~ 18	3.3 ~ 3.4
	28	>15	0.45	5.7	18 ~ 18.2	3.3
	29	5	0.11	5.7	18.2 ~ 18.6	3.3
	30	13	0.32	5.7	18 ~ 18.2	3.3
	31	>15	0.43	5.7	18.2 ~ 18.4	3.3
	32	>15	0.39	5.7	18 ~ 18.2	3.3
	25	33	10	0.12	5.7	17 ~ 17.2
34		13	0.18	5.7	17.2 ~ 17.6	3.2
35		12	0.04	5.7	17 ~ 17.4	3.2
36		>15	0.23	5.7	17 ~ 17.4	3.2
37		>15	0.33	5.7	17.2 ~ 17.4	3.2
38		>15	0.48	5.7	17.2 ~ 17.4	3.2
39		>15	0.52	5.7	17 ~ 17.4	3.2
40		>15	0.62	5.7	17.2 ~ 17.4	3.2
41		11	0.21	5.8 ~ 6	17.6 ~ 18.4	3.2
60		42	2	0.20	5.3	15.8
	43	3	0.05	5.3	15.6 ~ 16	3.6
	44	5	0.14	5.3	16 ~ 16.4	3.4
	45	3	0.07	5.3	15.6 ~ 16	3.6
	46	4	0.12	5.3 ~ 5.5	15.6 ~ 16.6	3.6
	47	3	0.39	5.6	16.6	3.6
	48	>15	0.34	5.2	15 ~ 15.2	3.6
	49	12	0.52	5.2	15 ~ 15.2	3.6
	50	>15	0.36	5.2	15.2	3.6

为了与实验结果进行比较分析,可根据式(2)和式(3)^[6]计算 I_m 及 t_m

$$\frac{I_m}{I_0} = \exp\left\{-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \arcsin \sqrt{1-\gamma^2}\right\} \quad (2)$$

$$\frac{t_m}{\frac{1}{4}T_0} = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{1-\gamma^2}} \arcsin \sqrt{1-\gamma^2} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, I_0 和 T_0 分别为无阻尼

($R=0$)条件下电容器放电电流的第一峰值及放电周期。

$$I_0 = U_0 / \sqrt{L/C} \quad (4)$$

$$T_0 = 2\pi \sqrt{LC} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{R/2}{\sqrt{L/C}} \quad (6)$$

其中 U_0 为电容器充电电压 (-45°C 和 25°C 时, U_0 为 5.7kV 。 60°C 时, U_0 为 5.3kV) , C 为回路电容 $6.6\mu\text{F}$, L 为回路电感 $0.48\mu\text{H}$, R 为回路电阻 $2\text{m}\Omega$ 。将实验测得的相关结果代入式(2)和式(3)计算,可得到不同温度下 I_m 及 t_m 的理论值,其中 -45°C 和 25°C 环境下, $I_m = 17.8\text{kA}$, $t_m = 3.2\mu\text{s}$,与实验数据 $17 \sim 18\text{kA}$, $3.2 \sim 3.3\mu\text{s}$ 相比基本相同, 60°C 环境下, $I_m = 16\text{kA}$, $t_m = 3\mu\text{s}$,与实验数据 $15.6 \sim 16\text{kA}$, $3.6\mu\text{s}$ 相比 t_m 明显偏小。由式(3)可以发现, t_m 主要随 C 和 L 变化,当 C 或者 L 增加时, t_m 变大,反之亦然,而实验中回路电容 C 即为电容器的容值 $6.6\mu\text{F}$,可直接测量,因此 t_m 的实验值相对理论值偏大只能是由于回路的电感变大导致的,而回路电感主要由电容器内感、负载以及开关电感组成,其中负载为 $0.48\mu\text{H}$,可直接测量,实验中所用开关为三电极火花开关,其间隙 $d = 2\text{cm}$,代入火花开关导通电感公式(7)^[7]

$$L \approx 14d \quad (7)$$

由式(7)计算得开关与导通电感 L 为 28nH 。开关的导通电感与负载相比可以忽略不计,因此回路电感的变大只能是由于电容器内感变大导致的。将 60°C 环境下测得的 t_m 值代入式(3),可以计算出此时的回路电感为 $0.59\mu\text{H}$ 。这表明在 60°C 环境下,电容器自身的内感相对于 -45°C 和 25°C 环境下有所增加,计算得其大约增加了 100nH 。

电容器过载放电实验中,在 $-45 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内对电容器充过电压,使其储能密度达到额定储能密度的 1.8 倍,且 I_m 均大于 15kA 时,27 个电容器均成功放电,因此可采用公式(8)^[8-10]

$$F = 0, R_L = \sqrt[n]{1 - \gamma} \quad (8)$$

计算此时电容器能够单次过载可靠工作的单侧置信下限,式中, n 为样本大小, F 为失败数, γ 为置信水平, R_L 为可靠度 R 的单侧置信下限。根据计算得,在 0.95 的置信水平下,其 R_L 为 0.9 。这表明,在 $-45 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内过载运行 MPP 电容器,使其储能密度达到额定储能密度的 1.8 倍,且 I_m 为 15kA ,此时可实现单次过载可靠工作。

3 结论

本文研究了 MPP 电容器在不同温度下的过载

特性。研究发现,在 $-45 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内过载运行 MPP 电容器,其储能密度可达额定储能密度的 1.8 倍,且放电电流第一峰值为 15kA 。此时在 0.95 的置信水平下,其过载运行的可靠度单侧置信下限为 0.9 ,可实现单次过载可靠工作。这为脉冲电容器的过载运行提供了重要的实验依据,为爆磁压缩激励电流源的紧凑化提供了一个有效的方法。

参考文献 (References)

- [1] 李小林, 陈冬群, 李达, 等. MA 量级小型螺线管爆磁压缩发生器[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2492-2496.
LI Xiaolin, CHEN Dongqun, LI Da, et al. Miniature MA-level helical explosively-driven magnetic flux compression generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2492-2496. (in Chinese)
- [2] Shkuratov S I, Kristiansen M, Dickens J C, et al. High current testing of batteries[J]. IEEE Conference Publications, 2001: 1563-1566.
- [3] Sergey I S, Kristiansen M, Dickens J C, et al. High-current and high-voltage pulsed testing of resistors [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(5): 1607-1614.
- [4] Shkuratov S I, Talantsev E F, Dickens J C, et al. Single shot overstressing of high voltage capacitors for compact arkaiev-marx generator[J]. IEEE Conference Publications, 2003: 723-726.
- [5] Nagao M, Fukuma M, Ohsachi N, 等. 聚丙烯薄膜在高温区的电击穿[J]. 电力电容器, 1986, 1: 80-83.
Nagao M, Fukuma M, Ohsachi N, et al. Breakdown characteristic of polypropylene film in high temperature zone[J]. Power Capacitor, 1986, 1: 80-83. (in Chinese)
- [6] 曹亦兵. 低阻无箔渡越辐射振荡器的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
CAO Yibing. Investigation of a foilless transit radiation oscillator with low-impedance [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [7] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 346-348.
LIU Xisan. High pulsed power technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 346-348. (in Chinese)
- [8] 张玉春, 姚俊. 小样本成败试验可靠性评估方法[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2006, 22(3): 44-47.
ZHANG Yuchun, YAO Jun. Reliability estimation methods based on experience information method[J]. Natural Sciences Journal of Harbin Normal University, 2006, 22(3): 44-47. (in Chinese)
- [9] 王小林, 郭波, 程志君. 基于维纳过程金属化膜电容器的可靠性评估[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(7): 6-9, 13.
WANG Xiaolin, GUO Bo, CHENG Zhijun. Reliability evaluation of metalized film capacitor based on Wiener process[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(7): 6-9, 13. (in Chinese)
- [10] 王小林, 程志君, 郭波. 基于维纳过程金属化膜电容器的剩余寿命预测[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(4): 146-151.
WANG Xiaolin, CHENG Zhijun, GUO Bo. Residual life forecasting of metalized film capacitor based on Wiener process[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(4): 146-151. (in Chinese)