

文章编号: 2095-4980(2016)03-0457-04

CT47 型脉冲功率高压陶瓷电容器性能

汪 庆, 黄振卫, 杜 涛

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 基于材料和工艺特点, 对新研锆钛酸钡基 CT47 型脉冲功率电容器的高压脉冲放电性能和贮存性能进行了分析, 并根据脉冲功率应用场景设计了系列化性能研究实验。实验结果表明, 该电容器温度特性良好, 高压脉冲放电性能稳定, 耐压值高, 绝缘性能好, 为该电容器在脉冲功率领域的应用奠定了良好的基础。

关键词: 高压陶瓷电容器; 脉冲功率; 放电电流; 放电寿命

中图分类号: TN78; TM534^{+.1}

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201603.0457

Performance of CT47 type pulse power high-voltage ceramic capacitor

WANG Qing, HUANG Zhenwei, DU Tao

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: According to the material and the craft characteristics, high-voltage pulse discharge and store performance of lately developed CT47 type pulse power capacitor based on Zr-Ba-SiO₃ is analyzed. Then, a series of performance search experiments is designed according to pulse power application scenes. The result indicates that this capacitor has preferable temperature performance, steady high voltage pulse discharge characteristic, high permissible voltage, and excellent insulation capability. Above-mentioned analysis and experiment lay a good foundation in the application of pulse power realm for the capacitor.

Key words: high-voltage ceramic capacitor; pulse power; discharge current; discharge life

高压陶瓷电容器具有体积小, 耐压高, 频率特性好等特点^[1], 近年来随着材料、电极、制造技术的进步, 高压陶瓷电容器有了长足的发展, 并在高压倍压电路、高压放电回路和脉冲形成线等多方面得到广泛应用^[2-4]。华中科大以 BaTiO₃ 基陶瓷制作脉冲功率高压陶瓷电容器, 工作电压 500 V~1 000 V, 容值 $\leq 1 \mu\text{F}$ ^[5]。南京工业大学在 Sr-Ba-Ti 系基础上研究 MgTiO₃ 掺杂对高压陶瓷材料介电性能的影响^[6], 分析了制备工艺^[7]。中国工程物理研究院研究指出铌镁酸铅(Pb(Mg_(1/3)Nb_(2/3))O₃, PMN)基铁电陶瓷适合于大容值、大电流、高功率、高储能密度的高压脉冲电容器, 不足之处是电场击穿强度低, 居里温度较低, 负温度损耗大, 需要进行一定的掺杂改性和工艺改进^[8]。西安交通大学和中国科学院化学研究所工程塑料国家重点实验室研究了环氧包封层对高压陶瓷电容器耐电压水平的影响^[9]。某公司近期研制了 CT47 型脉冲功率高压陶瓷电容器, 介质材料采用自制的陶瓷介质粉料, 其主要成份为锆钛酸钡。电容器标称值为: 容值 0.1 μF 、耐压 4 kV、体积 1.88 cm³, 依据标称值计算出储能密度为 0.425 J/cm³, 具有体积小, 耐压高, 储能密度高等优点。

为考核 CT47 型脉冲功率高压陶瓷电容器(以下简称脉冲电容器)在脉冲功率领域的应用性能, 本文基于材料和工艺特点对脉冲电容器高压脉冲放电性能和贮存性能进行分析, 设计了系列化实验(常温放电寿命、高温放电寿命、高低温放电性能、高低温容值变化、耐压)对脉冲电容器性能进行考核, 结果表明, 脉冲电容器长期贮存性能好, 温度特性良好, 高压脉冲放电特性稳定, 耐压值高, 绝缘性能好, 适用于脉冲功率领域。

1 基于材料和工艺的性能分析

脉冲电容器主要由陶瓷介质、70Ag/30Pd 贵金属内电极、金属外电极等 3 部分组成。采用电子陶瓷材料作为介质, 和 70Ag/30Pd 贵金属内电极经交互叠层, 烧结后成为一种独石结构。

脉冲电容器陶瓷介质材料通过掺杂改性后,材料的居里温度被移到较低的温度($-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下)。在居里点以上温度,材料的晶粒具有对称结构,不存在自发极化,其工作温度范围内($-55\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +125\text{ }^{\circ}\text{C}$),材料属于顺电性,不具有铁电性,可承受高压脉冲大电流反复冲击,适用于脉冲功率领域。介质材料经过高温($1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)烧结后,形成的陶瓷介质非常稳定,理论上可以放置无限长时间。内电极材料采用钼银合金,并与陶瓷介质一起共烧,由于其存在于陶瓷电容器的内部,不与外界直接接触,而陶瓷材料经高温烧结后,晶体结构致密,没有明显的孔洞,更没有连接到内部电极的通道,因此内部电极材料可长期储存,不会出现氧化等不良现象。外部电极由银、镍、锡铅组成,工艺过程为在基体材料金属银外面电镀一层致密的金属镍,最后电镀上锡铅可焊层,在产品长期储存过程中,与外界直接接触的是锡铅可焊层,但长期储存的产品是已经焊接完成,即使锡铅可焊层被部分氧化,仍不会影响产品的性能,加之中间存在一层致密的金属镍,所以产品在长期储存过程中,其外部电极仍能保持完好,不会影响其性能。

2 性能实验设计

选择 5 片脉冲电容器作为性能研究实验样品,标记为 1#~5#,利用电桥测量其初始容值和损耗角。

2.1 常温放电寿命实验设计

选择 1#电容进行常温放电寿命实验,实验电路见图 1。

为避免高温焊接对电容性能产生影响,使用夹具对电容适当夹紧,使其不会因为和两侧金属片有缝隙而打火,也不会因为过紧而损坏电容。另

外,高压电容、开关、电流环组成的回路设计尽量小,以减小回路电阻和电感,获得更大的放电电流。高压电源加电 4 kV , $C1$ 为 1#电容, $R3$ 为限流电阻, $R1$ 和 $R2$ 为高压分压电阻。每 15 s 触发放电一次,每触发 100 次退去高压,记录放电电流峰值和周期,并标记为一个时间区间,间隔 1 min 再次加高压,共触发 3 000 次。

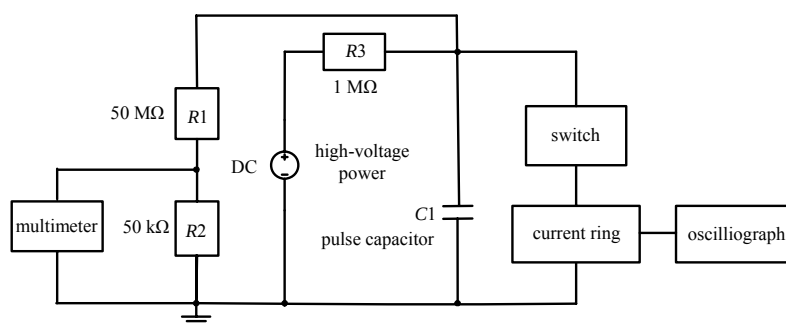


Fig.1 Circuit of normal temperature discharge life experiment

图 1 常温放电寿命实验电路

2.2 高温放电寿命实验设计

为测试电容的高温放电性能,将 2#电容放到温箱中,加热到 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行放电寿命实验,实验电路见图 1。同样每 15 s 触发一次,每触发 100 次退去高压,记录放电电流峰值和周期,并标记为一个时间区间,间隔 1 min 再次加高压,共触发 3 000 次。

2.3 高低温放电性能实验设计

选择 3#电容进行高低温放电性能实验,实验电路见图 1。将电容置于温箱中,分别将温度调整到 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$,并在保持该温度 30 min 后进行触发实验。持续加电 4 kV ,间隔 30 s 触发一次,每种温度环境下触发 20 次。

2.4 高低温容值变化实验设计

选择 4#,5#电容置于温箱中,分别将温度调整到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$,并在保持温度 30 min 后测量其容值随温度的变化。

2.5 耐压实验设计

对所有做过实验的电容进行耐压实验,实验电路见图 2。 $K1$ 初始状态为闭合,保持 1 min 高压加电后, $K1$ 支路断开,电流通过电流表,可测得电容漏电流 I_0 。

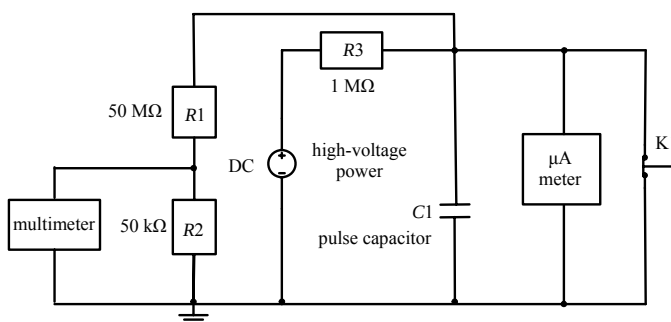


Fig.2 Breakdown test experiment circuit

图 2 耐压实验电路

3 性能研究实验结果及分析

1) 实验前后(耐压实验除外)容值和损耗角变化。如表 1 所示, 电容在经过章节 2.1~2.4 实验后, 均有一定的容值损失, 最大减少 1.90%。损耗角均有增大, 但实验前后均处于一个数量级, 最大增加 174%。

表 1 实验后容值和损耗角变化

Table 1 Capacity and loss angle changes after experiment

No.	capacity before/nF	capacity after/nF	capacity change/nF	capacity change/%	loss angle before(10^{-4})	loss angle after(10^{-4})	loss angle change(10^{-4})	loss angle change/%
1# (experiment item 2.1)	99.28	97.63	-1.65	-1.67	2.7	7.4	+4.7	+174
2# (experiment item 2.2)	97.09	95.25	-1.84	-1.90	2.8	6.7	+3.9	+139
3# (experiment item 2.3)	98.03	96.97	-1.06	-1.08	2.5	6.5	+4.0	+160
4# (experiment item 2.4)	98.15	96.54	-1.61	-1.64	2.9	7.4	+4.5	+155
5# (experiment item 2.4)	98.42	96.58	-1.84	-1.87	2.7	7.4	+4.7	+174

2) 高压脉冲放电稳定性。1#电容常温放电寿命实验中, 放电电流峰值 $I \in [3.46, 3.54]$ kA, 周期 $T \in [534, 544]$ ns; 2#电容高温放电寿命试验中, 放电电流峰值 $I \in [3.52, 3.66]$ kA, 周期 $T \in [484, 500]$ ns。可见, 常温 3 000 次放电考核下, 1#电容电流峰值极差仅 0.08 kA, 周期极差仅 10 ns; 高温 3 000 次放电考核下, 2#电容电流峰值极差仅 0.14 kA, 周期极差仅 16 ns。因此, 可认为脉冲电容器常温或高温高压脉冲大电流放电性能稳定。

3) 温度对放电电流、容值的影响。3#电容高低温放电性能实验中, 在温度 $t \in [-45\text{ }^{\circ}\text{C}, 85\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 时, 放电电流峰值 $I \in [3.52, 3.76]$ kA, 周期 $T \in [480, 550]$ ns。而其常温下的初始 $I = 3.72$ kA, 周期 $T = 512$ ns, 因此相对于常温, $\Delta I \in [-5.4\%, +1.1\%]$, $\Delta T \in [-6.2\%, +7.4\%]$ 。高低温容值变化实验中, 4#电容容值 $C_4 \in [86.58, 111.29]$ nF, 相对于常温 $\Delta C_4 \in [-11.7\%, +13.5\%]$; 5#电容容值 $C_5 \in [86.63, 111.88]$ nF, 相对于常温 $\Delta C_5 \in [-11.3\%, +14.5\%]$ 。可见, 脉冲电容器随着工作温度的升高, 电容量、放电电流峰值、周期均减小, 工作温度降低, 电容量升高, 电容量、放电电流峰值、周期均增大, 但尚属可接受范围, 温度特性良好。

4) 耐压分析。选择 1#和 2#电容进行耐压极限测试, 2#电容加电 4 kV, 保压 1 min 正常, 漏电流 $I_0 = 0.2\text{ }\mu\text{A}$; 加电 4.8 kV, 保压 1 min 正常, 漏电流 $I_0 = 0.1\text{ }\mu\text{A}$; 加电 6 kV, 电容被击穿, 不能再次加高压, 如图 3 所示。

选择 1#电容, 依次加电 4 kV, 4.8 kV, 5.0 kV, 5.2 kV, 5.4 kV 和 5.6 kV, 保压 1 min 均正常, 漏电流均为 $0.1\text{ }\mu\text{A}$ 。因此剩下的电容耐压测试点选择为 4 kV, 4.8 kV 和 5.5 kV, 保压 1 min 正常, 然后按下开关 K1 测量漏电流, 均小于 $0.2\text{ }\mu\text{A}$ 。

耐压满足超出标称值(4 kV)20%以上, 绝缘电阻约 $20\text{ G}\Omega$, 大于标称值 $10\text{ G}\Omega$, 耐压和绝缘性能很好。

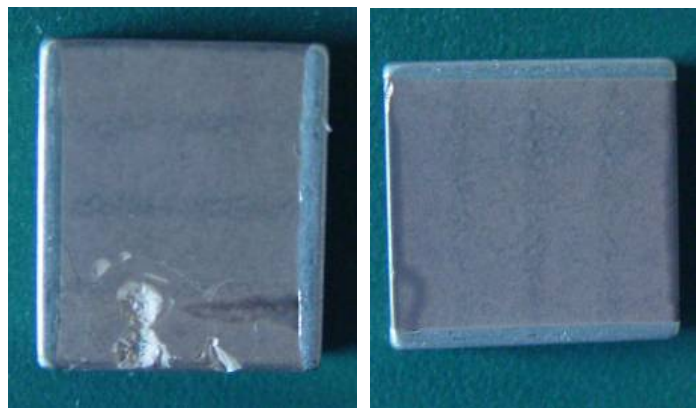


Fig.3 Front and back sides of No.2 capacitor after broken-down
图 3 2#电容被击穿后正反面图

4 结论

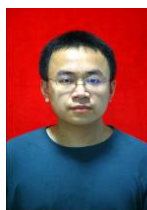
本文研究了脉冲电容器在脉冲功率领域的应用性能, 分析了长期贮存性能, 设计了常温放电寿命、高低温容值变化、高低温放电性能、高温放电寿命、耐压等系列化实验。初步分析认为脉冲电容器长期贮存性能好, 温度特性良好, 高压脉冲放电特性稳定, 耐压值高, 绝缘性能好, 在脉冲功率领域具有广泛的应用场景。

参考文献:

- [1] ANNIE S, JEAN R. New lead-free non-stoichiometric perovskite relaxor ceramics derived from BaTiO_3 [J]. Solid State Sic., 2003(5):1459-1465.
- [2] 杨集, 杜涛, 赵翔, 等. 基于电容放电单元的爆炸丝起爆特性数值分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(3): 461-465. (YANG Ji, DU Tao, ZHAO Xiang, et al. Numerical analysis of exploding wire initiation characteristic based on capacitor discharge unit[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(3):461-465.)

- [3] 欧阳洲,王学杰,李兴元. 微光夜视仪用无铅高压陶瓷电容的研发[J]. 贵州大学学报, 2011,28(2):54-57. (OUYANG Zhou,WANG Xuejie,LI Xingyuan. Unleaded high voltage ceramic capacitor for Low-Light-Level(LL) night vision device[J]. Journal of Guizhou University, 2011,28(2):54-57.)
- [4] 张艳. 低阻抗 Blumlein 型脉冲形成网络设计与实验[J]. 测控技术, 2010,29(9):77-79. (ZHANG Yan. Design and experiment of low impedance Blumlein pulse forming network[J]. Supervision Technology, 2010,29(9):77-79.)
- [5] 戴玲,林福昌,朱志芳,等. 高储能密度陶瓷电容器电气性能研究[J]. 高电压技术, 2004,30(10):49-51. (DAI Ling,LIN Fuchang,ZHU Zhifang,et al. Electrical characteristics of high energy density ceramic capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2004,30(10):49-51.)
- [6] 何伟,李斌,张其土. 低介电常数无铅高压陶瓷电容器材料[J]. 材料科学与工程学报, 2008,26(2):281-283. (HE Wei, LI Bin,ZHANG Qitu. Lead-free ceramics capacitor materials of low dielectric constant and high voltage[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2008,26(2):281-283.)
- [7] 景文斌,李少炳,徐亮,等. 制备工艺对钛酸钡基无铅高压陶瓷电容器材料性能的影响[J]. 稀有金属, 2012,36(2):286-291. (JING Wenbin,LI Shaobing,XU Liang,et al. Effect of preparation technique on BaTiO₃-base lead-free high voltage ceramic capacitor materials[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012,36(2):286-291.)
- [8] 彭家根. 高压脉冲电容用 PMN 铁电陶瓷的高压特性[J]. 真空电子技术, 2008(1):55-57. (PENG Jiagen. High-voltage properties of the PMN ferroelectric ceramics for high-voltage pulse capacitors[J]. Vacuum Electronics, 2008(1):55-57.)
- [9] 王德生,杨士勇,刘斌,等. 环氧包封层对高压陶瓷电容器耐电压水平的影响研究[J]. 电工电能新技术, 2002,21(4):26-28. (WANG Desheng,YANG Shiyong,LIU Bin,et al. Effect of epoxy cover on withstand voltage for high voltage ceramic capacitor[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002,21(4):26-28.)

作者简介:



汪庆(1987-),男,四川省资阳市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为武器电子学. email:475616226@qq.com.

黄振卫(1975-),男,广西壮族自治区贵港市人,硕士,副研究员,主要研究方向为武器电子学.

杜涛(1971-),男,四川省绵阳市人,硕士,研究员,主要研究方向为武器电子学.