

文章编号: 1001-4322(2003)01-0094-03

高储能密度电容器*

林福昌, 代 新, 徐智安, 李 劲, 姚宗干

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 电容器是脉冲功率设备的重要储能元件, 提高电容器的储能密度能有效地减小脉冲电源的体积。根据箔式结构电容器的缺点及其击穿机理, 采用金属化膜和混合膜结构技术, 研制出了两种高储能密度高压脉冲电容器, 储能密度分别超过 800J/L 和 500J/L。

关键词: 电容器; 储能密度; 脉冲

中图分类号: TM531.2 **文献标识码:** A

在脉冲功率设备中, 作为储能元件的电容器在整个设备中占有很大的比重, 是极为重要的关键部件。我国现有的大功率脉冲电源中采用的电容器基本上是按电力电容器的生产模式制造的箔式结构的电容器, 其存在储能密度低、发生故障后易爆炸的缺陷。目前国内脉冲功率电源中所用电容器的储能密度一般为 100~200J/L, 少数达到 500J/L。国际上所用脉冲电容器的储能密度水平在 500~1 000J/L, 形成商品的电容器的储能密度约为 500J/L。提高电容器的储能密度, 将有效地减小大功率脉冲电源的体积。

1 提高电容器储能密度的途径

电容的形成原理可用在两块导电电极之间夹有绝缘材料层的平板型电容结构来说明。当两电极之间施加电压 U , 极板上将储存电荷 Q , 电极间的电容量 C 为

$$C = Q/U = S/d \quad (1)$$

式中: ϵ 为绝缘介质的介电常数; S 为极板面积; d 为绝缘介质的厚度。设电容器储存的能量为 W , 则

$$W = (1/2) CU^2 = (1/2) S U^2/d = (1/2) V_i E^2 \quad (2)$$

式中: V_i 为绝缘介质的体积; E 为绝缘介质承受的电场强度。

电容器中的能量储存在两金属电极之间的绝缘材料中, 绝缘材料的体积储能密度为

$$D_i = 1/2 E^2 \quad (3)$$

由(3)式可见, 提高电容器的储能密度的方法有两种: (1) 提高 ϵ 值。这意味着采用高介电常数的膜。但现有高介电常数的膜均为极性材料, 这种材料一般电导率较大, 击穿场强较低; (2) 提高工作场强。目前这是一条最重要的途径, 因 D_i 与 E 的平方成正比, 国内外的电容器研究, 主要侧重在这方面。

2 箔式结构脉冲电容器

现有箔式结构的脉冲电容器普遍采用纸膜复合的介质结构。这种电容器主要利用纸和聚酯膜的高介电常数及纸良好的浸渍性能。但纸的物理结构疏松, 导致这种复合介质的击穿强度较低。因此, 从现有水平看, 再提高这种电容器的储能密度是很困难的。从提高介质的工作场强出发, 高储能密度电容器的介质材料应选择击穿强度较高的聚合物膜, 而不是纸膜复合介质。

作者对多层聚丙烯介质的脉冲电容器进行了实验研究。这种电容器采用聚丙烯膜作为介质材料。试制了两层膜和三层膜的电容器。对这种电容器进行了寿命试验。首先按 333V/ μm 的直流加压一分钟后, 再按 300V/ μm 的场强进行周期为 1ms、反峰为 20% 的充放电试验。并以通过的充放电次数作为寿命的指标。

其中一种工艺采用了引线片包铝箔的方法, 试品的击穿原因主要与引线片有关, 在引线片处发生击穿的比例达到 75.5%。由此可见, 引线片包铝箔增大了接触电阻, 降低了寿命。某一批隐箔式三层膜电容器试品击穿点位置分布如图 1 和表 1 所示。

从表 1 可以看出, 电容器元件的击穿点很分散, 其中引线片的问题较为突出。试验还发现, 由于膜中电弱

* 收稿日期: 2002-01-16; 修订日期: 2002-07-08

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 林福昌(1969-), 男, 博士, 副教授, 从事高电压技术和脉冲功率技术的教学和研究工作; E-mail: fclin@public.wh.hb.cn。

表 1 电容器击穿点分布情况

Table 1 Distribution of breakdown points in capacitors

position No.	positions of breakdown points	breakdown number
1	middle parts of the elements	89
2	margin of the tabs	42
3	middle of the tabs	12
4	margin of the foils	4
5	turning margin	13

点的影响,电容器元件的寿命分散性很大,如图 2 所示为压紧系数大小与元件平均寿命的关系。由此可以看出,箔式结构电容器存在的主要问题是:(1)膜中电弱点的影响。由于薄膜中电弱点的存在,使电容器往往无固定的击穿点,使寿命变得难以预测。考虑到电容器工作的可靠性,电容器介质的工作场强不可能取得很高;(2)引线片的影响。引线片是用来引出电容器电流的铜电极,与铝箔贴合。引线片引起两个问题:(a)机械加工引线片存在毛刺,这些毛刺易破坏膜的物理结构,导致击穿强度下降;(b)引线片的周围的电场畸变,形成局部高场强区。采用引线片包铝箔的办法可抑制上述因素影响,但其导致引线片与铝箔接触电阻增大,作为脉冲电容器时,容易引起引线片处发热,导致热击穿^[1]。

3 电容器介质的击穿机理

在电场作用下,由电极发射进入介质的电荷载流子(电子或空穴),被介质中的陷阱带所俘获,成为陷阱电荷。介质在高场强下出现带电现象,介质中空间电荷的形成,与陷阱电荷的产生密切相关。介质中的空间电荷效应,限制了电容器的使用寿命,也限制了电容器向更高场强和更高储能密度发展。在电场注入载流子的过程中,自由载流子与陷阱电荷碰撞,发生碰撞电离退陷阱化。如果碰撞电离足够强烈,以至于移走材料结构中的束缚电荷,导致结构的破坏,这时就可引发介质击穿。碰撞电离退陷阱化可作为介质击穿的先导^[2]。根据碰撞电离退陷阱化理论,碰撞电离退陷阱化系数与自由电荷数目和放电速度有关,自由电荷数目越多,放电速度越快,碰撞电离退陷阱化也越剧烈^[3]。

高储能密度脉冲电容器在高电场下工作,因此在充电阶段进入介质的载流子就比较多。这种电容器的放电速度非常快,因此在介质中的碰撞电离就很剧烈。根据碰撞电离退陷阱化理论,应减少由电极发射的进入介质的载流子的数目,从而提高脉冲电容器的使用场强,提高脉冲电容器的储能密度。

4 新型高储能密度高压电容器

应用碰撞电离退陷阱理论和针对箔式电容器的缺陷,提高电容器的储能密度可从以下方法入手:(1)设法减小电极附近的场强或采用具有高逸出功的金属电极,使由电极进入绝缘介质的电子数减少,从而减少碰撞电离的几率;(2)剔除由电弱点导致的绝缘薄膜击穿通道,使其它未含击穿点的薄膜能继续使用。鉴于此,作者采用了以下两种技术:(1)将高介电常数薄膜(如聚酯膜)与低介电常数薄膜(如聚丙烯膜)组成复合绝缘,利用高介电常数的薄膜在电极周围形成低电场区,从而抑制自由电子的产生;(2)采用膜上金属化电极技术。金属化膜的电极厚度仅 0.01 μm 左右。当金属化膜发生击穿后,储存在电容器中的能量迅速经此短路点释放,瞬间巨大的电流流经短路点,产生的热能在瞬间将击穿点周围的电极蒸发,从而在上下电极间形成沿面绝缘,保证整个电容器能恢复绝缘,从而能继续工作^[4,5]。这种电容器能有效限制电弱点的影响。

4.1 金属化膜电容器

要保证金属化膜电容器能在高场强下正常工作,必须使其在每次击穿时都能实现良好的自愈,即金属电极迅速蒸发,且击穿点处膜的烧蚀是小范围的,否则会发发生贯穿性击穿。因此,要求自愈时所用能量应尽量小。当能量过大时,自愈电流过大,造成击穿通道的大面积烧蚀,影响到其它绝缘层,造成永久性的击穿。实验结果

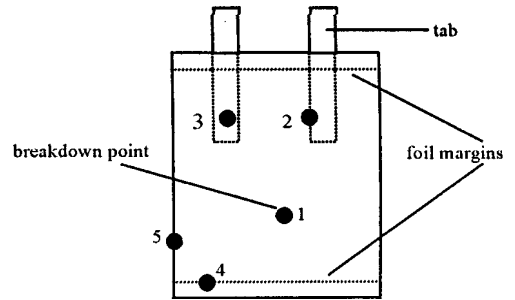


Fig. 1 Positions of breakdown points in capacitor element
图 1 试样击穿点位置图

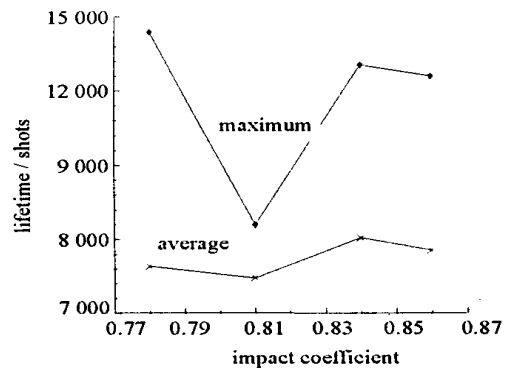


Fig. 2 Impact coefficient vs lifetime
图 2 压紧系数与寿命的关系

表明,金属化膜自愈能量可表示为^[6]

$$W = C t^2 U^4 \quad (4)$$

式中: C 为电容量; t 为蒸镀金属层厚度; U 为施加的电压。

由(4)式可以看出,金属化膜电容器通常工作于低压交流条件,在高压条件下需要克服自愈能力差的问题。

作者研制的这种电容器的击穿场强超过 $550\text{V}/\mu\text{m}$,采用串联结构实现较高的工作电压。实验结果表明,当充电后电场强度达到 $400\text{V}/\mu\text{m}$ 时,单台容量为 $18.5\mu\text{F}$ 的电容器的充放电寿命大于 30 000 次(放电周期 1.2ms ,放电电压反峰系数为 10%),此时电容器整体的储能密度超过 $800\text{J}/\text{L}$ 。

4.2 混合型电容器

金属化膜电容器具有自愈性能,但由于端部喷金等原因,产生两个缺点:卷绕时元件紧凑,导致浸渍不彻底使膜的击穿强度降低;端部通流能力差。箔式电容器不存在这些问题,但其无法自愈,因此也限制了它的工作场强。如果能将这两种电容器的优点结合起来,则可大大提高电容器的工作场强和可靠性。与传统的高压箔式电容器相比,这种方案将原来的两个铝箔电极中的一个用金属化膜上蒸镀的金属层取代,绝缘介质采用不同介电常数的薄膜混合而成。采用内串结构,引出线均从铝箔引出,其结构如图 3 所示。

初步试验结果表明,由于得到了彻底的浸渍,这种结构的电容器元件具有较高的击穿场强,电容器绝缘介质平均击穿场强达到 $420\text{V}/\mu\text{m}$ 以上。在 $380\text{V}/\mu\text{m}$ 的工作电压下,电容器的储能密度超过 $500\text{J}/\text{L}$,优化绝缘结构后,储能密度可以更高。这种结构的电容器具有金属化电容器的自愈性能及箔式电容器的大通流能力。

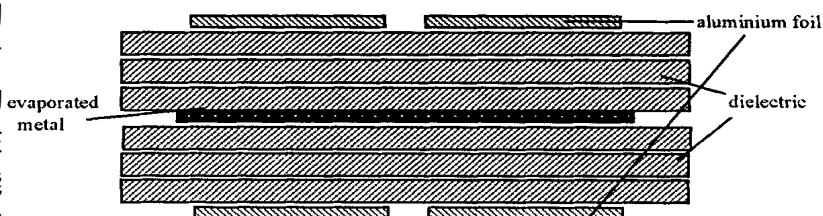


Fig. 3 Configuration of mixed capacitor

图 3 混合型电容器结构

对这两种结构的电容器的试验表明,储能密度均在箔式电容器的基础上得到了很大的提高,其中金属化膜电容器的储能密度达到 $800\text{J}/\text{L}$;初步试验结果表明,混合型电容器的储能密度达到 $500\text{J}/\text{L}$ 以上,有望应用于大电流脉冲领域。

参考文献:

- [1] 邓万婷,李劲,姚宗干,等.膜电容器引线片处热击穿问题的研究[J].高电压技术,1998,24(1):22—24. (Den W T, Li Jin, Yao Z G, et al. Research on the failure of the leading slice of all-film capacitors by heat. *High Voltage Engineering*, 1998, 24(1):22—24)
- [2] Kao K C. New theory of electrical discharge and breakdown in low-mobility condensed insulation[J]. *J Appl Phys*, 1984, 55(3):752—755.
- [3] 杨百屯,屠德民,刘耀南.碰撞电离退陷阱化[J].电工技术学报,1991,2:59—64. (Yang B T, Tu D M, Liu Y N. Impact ionization detrapping. *Transactions of Chinese Electrotechnical Society*, 1991, 2:59—64)
- [4] Heywang H. Physical and chemical changes in self-curing plastic capacitors[J]. *Colloid and Polymer Science*, 1976, 254:138—147.
- [5] Sarjeant W J, Zirnheld Jennifer, MacDougall F W. Capacitors[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1998, 26(5):1368—1392.
- [6] Reed C W, Cichanowski S W. The fundamentals of aging in HV polymer-film capacitors[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1994, 11(5):904—972.

High density capacitors

LIN Fuchang, DAI Xin, XU Zhiran, LI Jin, YAO Zong-gan

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Capacitors are important storage components in pulsed power equipment. In order to reduce the volume of the power source equipment, the energy storage density of the capacitors must be increased. This paper describes the basic breakdown mechanism of capacitors. To avoid the disadvantage of film-foil type capacitors, the authors present two new techniques, which are metallized film structure and mixed-film structure. The energy density of two kinds of capacitors is over $500\text{J}/\text{L}$.

Key words: capacitor; energy density; pulse