

金属化电容器中金属丝温升及断开机理

孔中华, 林福昌, 戴玲, 马亮, 李化

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

Temperature Rise and Blowing out Mechanism of Fuse in Metallized Capacitors

KONG Zhong-hua, LIN Fu-chang, DAI Ling, MA Liang, LI Hua

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

ABSTRACT: Safety electrode protects metallized capacitors from catastrophic breakdown, which helps the metallized capacitors achieve better self-healing as a role of second protection. The blowing out mechanism of the fuse in T-polypropylene metallized film, the energy for blowing, the relationship between broken-down energy and time, and the highest temperature rise of the fuse was analyzed. The experimental result shows that when the discharge time was more than $1.5\mu\text{s}$, small crack emerged in the fuses due to mechanical force on the heated fuse, and the metallized layer would be evaporated as the crack became long enough to generate disruptive discharge. When the discharge time was less than 150ns , small crack emerged in the fuses due to the current heat, and the metallized layer would be evaporated as the crack became long enough to generate disruptive discharge.

KEY WORDS: temperature rise; self-healing; fuse; metallized safety film

摘要: 采用安全膜结构的金属化电容器能防止贯穿性击穿, 从而起到二次保护作用。研究了T型金属化膜的熔丝断开机理、熔丝断开能量与时间的关系以及熔丝断开的机理, 计算了熔丝表面最高温升。实验结果表明: 当熔丝的通流时间大于 $1.5\mu\text{s}$ 时, 电流热效应产生的机械力使安全膜熔丝的金属层产生微小裂纹, 当裂纹达到一定长度, 两端发生击穿放电, 金属层因蒸发而断开; 当熔丝中通过较大的电流时, 短时间内 ($<150\text{ns}$) 的电流热效应使熔丝金属层发生熔化产生裂纹, 裂纹两端发生击穿放电, 金属层因蒸发而断开。

关键词: 温升; 自愈; 金属丝; 金属化安全膜

基金项目: 国家自然科学基金项目(50437020)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50437020).

0 引言

金属化膜脉冲电容器可实现高储能密度, 是由于其电极由蒸镀到有机薄膜上的一层薄金属(通常为铝或锌铝复合材料)组成, 从而可使绝缘介质在较高的电场强度下工作^[1]。最近几年, 军方对直接动能武器感兴趣(如电磁驱动新概念武器), 电磁发射炮促使高密度储能电容器发展^[2]。据报道, 2004年美国出现 100kJ , 储能密度达 2.2J/cc 的电容器^[3], 2005年美国电容器储能密度达 2.69J/cc ^[4]。电容器随着工作场强的提高易发生绝缘击穿甚至爆炸, 这主要是由于金属化膜自愈不彻底或自愈时击穿点绝缘区周围沉积的碳构成导电桥使电容器继续放电^[5]。采用安全膜结构可有效防止电容器发生爆炸。安全膜也称分割电极金属化膜, 采用分块蒸镀和非均匀蒸镀技术制作而成。安全膜由许多分割的金属化膜块组成, 不同膜块之间由蒸镀金属丝(熔丝)相连。当某一膜块中发生击穿时, 一方面击穿点会发生自愈; 另一方面, 未击穿的膜块中的电荷通过金属丝流向击穿的膜块, 由于金属丝不能承受大电流, 因此金属丝断裂, 从而隔断了未击穿膜块与击穿膜块间的电气连接, 限制了击穿点的短路电流, 使电容器可实现良好的自愈。自愈现象使电容量一直下降, 当电容量下降到5%, 电容器就不再被使用了^[6]。自愈过程可产生气体, 使电容发生“鼓肚”现象, 甚至使电容器发生爆炸。文献[7]采用安全膜的脉冲电容器, 即使电容量完全失去, 电容器也不会发生明显“鼓肚”或爆炸。

不同安全膜的主要区别在于分块形状和熔丝宽度的不同。熔丝宽度对电容器二次保护起着至

关重要的作用，熔丝太宽，不能起到二次保护作用；熔丝太窄，正常自愈就会使熔丝断开，电容器的容量会下降很快，因此选用合适宽度的熔丝对分割膜电容器有重要意义。目前，关于金属化膜熔丝研究报道很少，A.Schneuwly等通以研究近似稳定电流时窄熔丝的断开特性，认为离自愈点较远的熔丝的断开是热应力产生的机械力使金属层拉断而导致的^[8]。金属化膜发生自愈时，流过自愈点的电流不是恒定电流，而是脉冲电流。在日本T型安全膜使用较多，国内也有很多厂家使用^[9]。本文对通过脉冲电流后的T型金属化聚丙烯熔丝的断开能量与时间、厚度和方阻的关系进行了研究，计算了不同类型、不同宽度熔丝的最高温升，最后分析了熔丝的断开机理。

1 实验装置

实验采用金属化聚丙烯(MPP)膜，其厚度(μm)/实测方阻(Ω/□)分别为 9/23.6、7.5/38.5、6/7.9、6/8.9、8/2.7、8/13.2，熔丝宽度分别为2、4、6、8、10 mm。

熔丝形状如图 1 所示，由于电流收缩使接合部位的电阻变大，熔丝容易在接合部位断开，采用这种结构可以减小电流收缩效应。实验电路图如图 2，为减小电压纹波，采用两级RC滤波电路。图中： $C_1=11\ \mu\text{F}$ ； $C_2=14\ \text{nF}$ ； $R_1=230\ \text{k}\Omega$ ； $R_2=70\ \text{k}\Omega$ ； R_3 用于检测回路电流，阻值为 $1\ \Omega$ ；铜片压在熔丝两边金属化膜上，面积为 $4\ \text{cm}\times 6\ \text{cm}$ ，铜片上的负载为 $1.75\ \text{kg}$ 。图 2 中 R_1 和 R_2 的电阻值远大于熔丝电阻，因此 R_1 、 R_2 对电容 C_2 的放电时间基本无影响，试验时 C_2 放电时间为 $0.1\sim 15\ \mu\text{s}$ 。

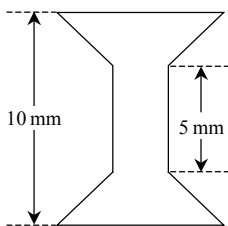


图 1 熔丝的形状
Fig. 1 Shape of fuse

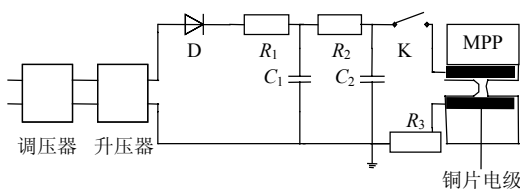


图 2 熔丝实验电路图
Fig. 2 Experimental circuit diagram

2 实验结果

Heywang最早对金属化膜自愈现象作了研究，结果表明当电压为 $150\ \text{V}$ 时，自愈击穿时间为 $1\sim 5\ \mu\text{s}$ ^[10]。Reed 等的研究结果表明电压为 $400\ \text{V}$ 时，自愈击穿时间约为 $20\ \mu\text{s}$ ^[11]。可见，自愈时间长短与加在膜上的工作电压有关。J.H.Tortai等通过测定光电二极管吸收光强的变化，发现自愈时间小于 $5\ \mu\text{s}$ ^[12]。本文实验采用针刺穿单片金属化膜模拟电容器层间压强对自愈的影响，发现自愈时间与加在膜上的层间压强有关，层间压强越小，自愈时间越长，最长可达到十几μs。

熔丝通流时间及能量与熔丝的电阻有关，图 3 给出了不同类型熔丝的宽度与电阻(包括电极与金属化膜的接触电阻)的关系。从图中可以看出，熔丝电阻与宽度的关系为非线性，这是由于熔丝越窄，电流收缩效应越强，其电阻变化越大。

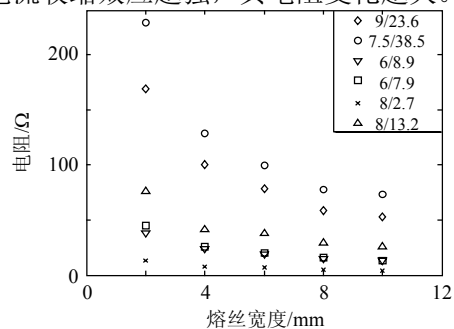


图 3 金属化膜的宽度与电阻的关系

Fig. 3 Relation between the resistance value and the width of fuse

实验中采用阶跃加压的方法，在熔丝两次放电后聚丙烯上的金属电极层完全断开，此时的电压作为熔丝断开电压，第一次放电通过熔丝的能量作为熔丝断开的能量。图 4(a)为熔丝在熔断电压下一次放电后的裂纹形状，熔丝上的树枝状裂纹是沿熔丝宽度方向横向生长，裂纹大部分都在熔丝的结合部位，中间部位裂纹较少。图 4(b)为宽度是 $6\ \text{mm}$ 的熔丝完全断开的形状，图 4(c)为宽度是 $8\ \text{mm}$ 的熔丝完全断开形状。熔丝越宽，放电断开电压越高，熔丝中蒸发的金属越多。

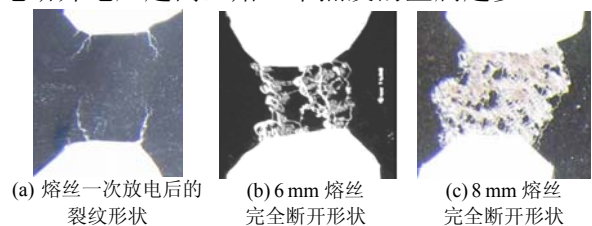


图 4 熔丝放电后产生的裂纹
Fig. 4 Crack shape after discharge under uncoupling voltage

金属化膜熔丝的宽度与断开能量的关系如图 5 所示，由图可知金属化膜熔丝断开的能量与熔丝的宽度有关，与聚丙烯的厚度相关性较小。这是由于聚丙烯热扩散半径由下式^[10]决定：

$$r \cong (at)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中：聚丙烯的热扩散率 $a=1.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ； t 为扩散时间。由式(1)可知，在 $10 \mu\text{s}$ 内，聚丙烯热扩散半径约为 $1.1 \mu\text{m}$ ，金属化膜厚度一般为几 μm ，因此在短时间内熔丝电流产生热量扩散半径小于其厚度。熔丝断开能量随宽度的增加而近似线性增加。当熔丝宽度相同，方阻相差不大时，其断开能量几乎相同；方阻相差较大时，方阻大的熔丝断开能量小。

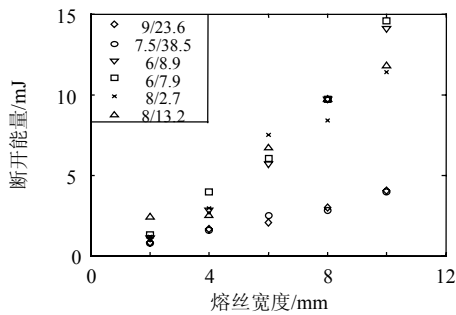


图 5 熔丝宽度与断开能量关系
Fig. 5 Relation between the uncoupling energy and the width of fuse

熔丝的放电时间与熔丝电阻有关，为考察熔丝断开能量与时间的关系，选用宽为 8 mm ，厚度/方阻分别为 $6/8.9$ 、 $8/2.7$ 的两种熔丝，通过串联不同阻值的电阻来改变熔丝的放电时间。图 6 中断开能量是根据串联回路中电阻大小计算出来的，图中放电时间为电容器放电常数的 1.5 倍。由图可知熔丝断开能量随放电时间的增加而减小，两种金属化膜的熔丝能量随时间的下降趋势很相似。方阻大的熔丝断开能量大，可能是熔丝金属组成成分不同引起的。

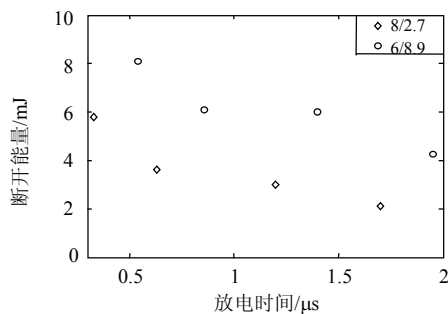


图 6 熔丝断开能量与放电时间关系
Fig. 6 Relation between the uncoupling energy and the discharge time

3 模拟计算

由式(1)可知，短时间内聚丙烯膜的热量扩散半径小于膜的厚度，而熔丝宽度和长度尺寸远大于其厚度，因此熔丝可以看作是半无限大平壁，忽略平壁的边缘散热，其温度分布可认为是一维温度场。电流通过金属层均匀发热，其形式包括金属层向空气对流散热和辐射散热、金属层吸热、聚丙烯的传导散热。

不考虑铝箔与聚丙烯的接触热阻，假定电流通过铝层产生的热量全部流向聚丙烯膜，熔丝热传导的微分方程及边界条件^[13]为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right] = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}, \quad x > 0, t > 0 \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = f(t) = \frac{U^2}{AR} e^{-\frac{2t}{RC}}, \quad x > 0, t > 0 \quad (3)$$

$$T=0, \quad t=0, x>0 \quad (4)$$

式中： k 为聚丙烯导热系数； ρ 为聚丙烯密度； C_p 为聚丙烯比热容； A 为熔丝表面积； R 为放电电阻； U 为熔丝断开电压； C 为电容； T 为熔丝温升。为简化计算，假定聚丙烯初温为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ， k 、 ρ 、 C_p 与温度无关。

式(2)~(4)可采用近似积分法求解，积分法可用求解各类一维瞬态热传导问题^[14-19]。将热传导方程对热层厚度 $\delta(t)$ 进行积分，可把微分方程中有关空间变量的导数去掉。通常选某一多项式作为热层温度分布面，实验经验表明：所选用的多项式高于 4 次后，解的精度不再有明显改进。

将式(2)对热层 $\delta(t)$ 进行积分，得

$$\left[\frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0}^{\delta} = \frac{d}{dt} \left[\int_0^{\delta} T dx - T \Big|_{\delta} \delta \right] \quad (5)$$

初始条件为

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = 0, T \Big|_{x=\delta} = 0, \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} = f(t)$$

式(5)变为

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{f(t)}{\rho C_p} \quad (6)$$

式中 $\theta \equiv \int_0^{\delta} T dx$ 。

令

$$T(x,t) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3 \quad (7)$$

式中的 4 个系数可由下列 4 个条件确定

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = 0, T \Big|_{x=\delta} = 0, \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} = f(t), \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{x=\delta} = 0$$

由此得到相应的剖面为

$$T(x,t) = \frac{\delta f(t)}{3k} \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)^3, \quad 0 \leq x \leq \delta \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 得热层厚度的微分方程为

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\delta^2 f(t)}{12\alpha} \right] = f(t), \quad t > 0 \quad (9)$$

式中 $\alpha = k/(\rho C_p)$ 。则方程的解为

$$T(x,t) = \frac{\left[\frac{6\alpha U^2 C}{f(t)A} - 6\alpha RC \right]^{1/2} f(t)}{3k} \times \left\{ 1 - \frac{x}{\left[\frac{6\alpha U^2 C}{f(t)A} - 6\alpha RC \right]^{1/2}} \right\}^3 \quad (10)$$

当 $x=0$ 时, 温度取极大值的条件为

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = 0$$

得

$$t = (RC \ln 2) / 2 \quad (11)$$

以厚度/方阻为 7.5/38.5 的熔丝为例: 熔丝宽度 $d=2$ mm; $R=230 \Omega$; $C=14$ nF; 熔丝断开电压 $U=380$ V; 铝的密度 $\rho_1=2700$ kg/m³; 对流导热系数 $h=10$ J·s⁻¹·m⁻²·K⁻¹; 铝的比热 $C_1=935$ J·kg⁻¹·K⁻¹; 熔丝的面积 $A=2.0 \times 10^{-5}$ m²; 聚丙烯密度 $\rho_2=906$ kg/m³; 聚丙烯比热容 $C_2=1.43 \times 10^3$ J·kg⁻¹·K⁻¹; 聚丙烯热扩散率 $\alpha=1.2 \times 10^{-7}$ m²·s⁻¹; 聚丙烯导热系数 $k=0.155$ w·m⁻¹·K⁻¹。

将式(11)代入式(10), 可得宽为 2 mm、厚度/方阻为 7.5/38.5 的熔丝最大温升 $T=51$ K。而文献[4]认为很窄的聚丙烯金属化膜熔丝断开温度为 170 °C, 当温度到 170 °C 时, 聚丙烯开始熔化^[20-21]。这是由于文献[8]中熔丝通过电流约为 0.3 A, 600 μs 后熔丝开始断开, 而实验中宽为 2 mm、厚度/方阻为 7.5/38.5 的熔丝通过脉冲电流幅值为 1.6 A, 通流时间为 4.5 μs。因此 7.5/38.5 熔丝最高温度(室温和最高温升之和)小于聚丙烯熔点。

由镀铝膜的电阻率为 2.8 μΩ·cm, 可算得厚度/方阻为 7.5/38.5 的金属化膜电极的厚度为 1 nm, 继而计算出铝箔吸收能量和空气对流散热能量之和小于熔丝断开的能量的 1%, 因此计算熔丝聚丙烯层温升时, 可忽略铝箔的吸热和对流散热。

由式(10), 熔丝表面温升最高时, 聚丙烯内部温度分布如图 7 所示, 可知随传递深度的增加, 温升下降很快, 靠近金属层部分的聚丙烯吸收大

部分能量。

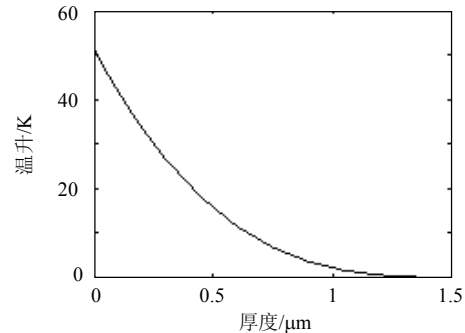


图 7 7.5/38.5 单位熔丝表面温升最大时内部温升分布
Fig. 7 Temperature rise distribution of 7.5/38.5 fuse when the surface has maximum temperature

图 8 中金属化膜的厚度/方阻分别为 7.5/38.5 和 9/23.8, 由图可知, 随熔丝宽度的增加, 熔丝表面最高温升也增加。图 9 中熔丝厚度/方阻为 8/2.7。由图 9 可知, 宽度为 2 mm 时, 熔丝表面最高温升达 230 K; 当宽度为 10 mm 时, 熔丝表面最高温升达 1 000 K。由铝的熔点为 660.4 °C, 铝的熔解热为 397 J/g, 可计算厚度/方阻为 8/2.7、宽度为 6 mm 的熔丝, 铝箔完全熔化需要吸收的能量约为 5 mJ。由图 5 可知铝箔完全断开需要吸收的能量为 7.5 mJ。考虑到聚丙烯熔化消耗一部分能量, 因此大致可以推测铝箔中有一部分发生熔化, 同时与铝箔相接触聚丙烯也发生熔化。

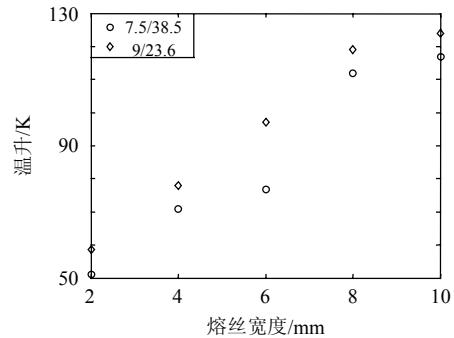


图 8 熔丝宽度与表面最高温升关系
Fig. 8 Relation between the width and the maximum temperature rise of 9/23.8 and 7.5/38.5 fuse

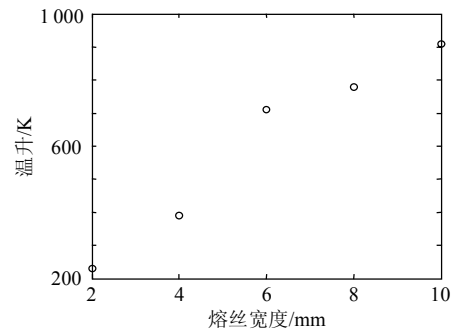


图 9 8/2.7 熔丝表面最高温升与宽度的关系

Fig. 9 Relation between the width and the maximum temperature rise of 8/2.7 fuse

实验中发现, 宽度相同时, 熔丝最高温升随方阻的增加减小。厚度/方阻为 6/7.9、6/8.9、8/13.2 的 3 种熔丝的最高温升都超过铝的熔点, 但比厚度/方阻为 8/2.7 的熔丝最高温升小。厚度/方阻为 6/7.9、6/8.9 的 2 种熔丝最高温升相差不大。熔丝表面最高温升与方阻大小有很大关系, 方阻对最高温升影响分为两方面: 方阻小, 则放电时间短; 金属层较厚, 则断开需要更多的能量。

为考察放电时间对熔丝断开能量的影响, 选用宽度为 8 mm, 厚度/方阻分别为 8/2.7、6/8.9 的 2 种熔丝, 实验中通过与熔丝串联不同电阻改变电路放电常数。电阻消耗能量与电阻值成正比, 因此式(3)中乘以电阻比例系数即可。计算结果如图 10 所示, 电阻为熔丝电阻与串联电阻之和。由图 10 可知, 熔丝表面最高温升随着放电时间的增加而减小。

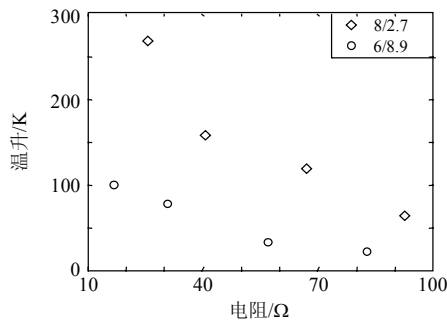


图 10 8/2.7、6/8.9 两种熔丝表面最高温升与放电电阻关系
Fig. 10 Relation between the resistance of fuse and the maximum temperature rise of 8/2.7 and 6/8.9 fuse

熔丝断开机理分析: 由熔丝最高温升的计算可知, 当熔丝通流时间小于 150 ns(电容器放电常数的 1.5 倍)时, 熔丝表面最高温升可达到铝的熔点; 当熔丝通流时间超过 1.5 μs 时, 熔丝表面最高温升不超过聚丙烯熔点。其原因在于, 熔丝的电阻小, 通流时间短, 但其断开电压高, 熔丝流过的峰值电流大, 熔丝热量在膜中传递的厚度小, 因此电阻小的熔丝最高表面温升也高。文献[22]发现经过 100 °C 热处理后的双向拉伸聚丙烯膜在一个方向收缩 10%, 而在另一个方向膨胀 10%。因此熔丝的断开有两种情况: 一种情况是, 当通过电流时间大于 1.5 μs 时, 聚丙烯和金属层的热应力而产生机械力使金属层裂开, 裂纹处电阻变大, 电流发热增加, 当裂纹长度达到一定程度时发生击穿放电, 电弧使金属层蒸发。另一种情况

是, 当熔丝通过电流时间小于 150 ns 时, 聚丙烯和铝熔化使金属层上产生裂纹, 然后击穿放电使金属层蒸发。由图 4(b)、(c)放电后熔丝形状, 可见图中有明显裂纹存在, 说明熔丝的断开不是金属层直接蒸发, 而是电弧放电使金属层蒸发而引起的。图 11 中熔丝的宽度为 2 mm、膜的厚度/方阻分别为 7.5/38.5, 放电电压为 210 V, 实验发现只有厚度/方阻为 9/23.6 和 7.5/38.5 这 2 种熔丝在一定电压范围内出现如图 11 所示的示波器记录的电压和电流波变化过程: 下降—稳定—下降—稳定。图 11 中波形电压保持的时间内, 电流为零, 说明熔丝此时是断开的。当电压下降到稳定值时, 电流有一个振荡波形, 说明此时发生电弧放电。图 11 验证了熔丝断开机理的正确性。

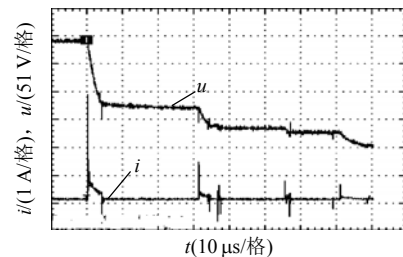


图 11 电压为 210 V 时熔丝放电波形
Fig. 11 Discharge waveform under 210 V

4 结论

本文研究了金属化膜熔丝的断开特性并计算了其表面最高温升, 得出以下结论:

1) 聚丙烯厚度对熔丝断开能量影响不大。方阻大小对熔丝断开能量影响很大, 方阻大的熔丝需要的断开能量较小, 方阻相差不大, 其断开能量几乎相同。同一种熔丝的宽度与断开能量近似成线性关系, 能量随宽度增加而增加。

2) 金属化膜熔丝断开能量随放电时间的增加而减小, 不同方阻的膜的下降曲线相似。

3) 熔丝表面最高温升与熔丝的电阻有关, 即与熔丝放电时间有关。当熔丝的放电时间在 150 ns 内, 熔丝表面温升可达铝的熔点, 熔丝的断开是聚丙烯熔化或金属层熔化使熔丝产生裂纹, 发生击穿放电使金属层蒸发而引起。当熔丝的放电时间超过 1.5 μs 时, 熔丝表面最高温升小于聚丙烯熔点, 此时熔丝的断开是电流热效应使聚丙烯层和金属层产生机械应力, 导致金属层产生裂纹, 发生击穿放电使金属层蒸发而引起。

参考文献

- [1] Joubert C. Etude des phénomènes électromagnétiques dans les condensateurs à films métallisés-nouvelles génération de condensateurs[D]. Lyon: Ecole Centrale de Lyon, 1996.
- [2] Wisken H G, Weise T H G G. Capacitive pulsed power supply systems for ETC guns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(11): 501-504.
- [3] Ennis B J, Yang X H, MacDougall F W, et al. High energy density capacitor characterization[C]. 2004 IEEE Power Modulator Conference, San Francisco, 2004.
- [4] Macdougall F, Ennis J, Yang X H, et al. Large high energy density pulse discharge capacitor characterization[C]. 2005 IEEE Pulsed Power Conference, California, 2005.
- [5] Betzler L, Kammermaier J. Chemical effect of atmospheric oxygen on the reactions in electrical breakdowns in PP [R]. Siemens Forschungs-und Entwicklungsberichte: Siemens Research and Development Reports, 1982.
- [6] Bramouille M, Marret J P, Michalczyk P, et al. Ultimate properties of the polypropylene film for energy storage capacitors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(11): 362-365.
- [7] Walter, Sarjeant J, Zirnheld J, et al. Capacitors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(5): 1368-1392.
- [8] Schneuwly A, Groning P, Schlapbach L. Uncoupling behaviour of current gates in selfhealing capacitors[J]. Materials Science and Engineering, 1998, 55(3): 210-220.
- [9] 许峰, 高鹏. 金属化安全膜防爆电容器的防爆原理及发展概况[J]. 电力电容器, 2006(5): 34-38.
Xu Feng, Gao Peng. Principle of explosion proof and general situation of development for metallized safety film Explosion proof capacitors[J]. Power Capaitors, 2006(5): 34-38(in Chinese).
- [10] Heywang H. Physical and chemical processes in self-curing plastic capacitors[J]. Colloid and Polymer Science, 1976, 254(12): 138-147.
- [11] Reed C W, Cichanowski S W. The fundamentals of aging in hv polymer-film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 904-922.
- [12] Tortai J H, Denat A, Bonifaci N. Self-healing of capacitors with metallized film technology experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(2): 159-169.
- [13] Ozisik M N. 俞昌铭译. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1980: 624-633.
- [14] Schlichting H. Boundary layer. Theory[M]. New York: McGraw-Hill Book Company Press, 1968: 27-31.
- [15] Goodman T R, Irvine T F, Hartnett J P. Advances in heat transfer [M]. New York: Academic Press, 1964: 267-271.
- [16] Reynolds W C, Dolton T A. The use of integral methods in transient heat transfer analysis[R]. Stanford California: Stanford University, 1958.
- [17] Yang K T. International developments in heat transfer[R]. New York: ASME, 1963.
- [18] Persson B, Persson L. Calculation of the transient temperature distribution in convectively heated bodies with integral method [J]. ASME Paper, 1964, 64(19): 234-239.
- [19] Castello F A. An evaluation of several methods of approximating solutions to the heat conduction equation[J]. ASME Paper, 1963, 63(44): 123-131.
- [20] Schneuwly A, Groning P, Schlapbach L. Temperature dependent dielectric breakdown strength of oil impregnated polypropylene foils[J]. Materials Science and Engineering B, 1998, 54(3): 182-188.
- [21] Briggs D, Kendall C R, Blythe A R, et al. Electrical discharge treatment of polypropylene film[J]. Polymer, 1983, 24(1): 47-52.
- [22] Linke D R. Handbook of Chemistry and Physics 76th Edition [M]. Boca Raton: CRC Press, 1995: 218-220.



孔中华

收稿日期: 2008-03-14。

作者简介:

孔中华(1970—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高电压新技术, kzhongh@163.com;

林福昌(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为脉冲功率技术与电力系统过电压。

(编辑 张玉荣)