

# 金属化膜电容器层间压强计算

孔中华, 林福昌, 戴玲, 马亮, 杨树春

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

Calculation of the Pressure Intensity between Layers of a Metallized Film Capacitor

KONG Zhong-hua, LIN Fu-chang, DAI Ling, MA Liang, YANG Shu-chun

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

**摘要:** 金属化膜电容器的优点是储能密度高、可靠性高及成本低, 其自愈特性和端部通流能力与层间压强有关。笔者用理论方法计算了层间压强, 并根据液体表面产生附加压强原理, 分析和计算了金属化膜电容器热处理前后层间压强的变化。计算结果表明, 电容器的层间压强是由里向外是递减的, 经热处理后的压强是热处理前压强的 3 倍以上。

**关键词:** 金属化膜电容器; 热处理; 层间压强

中图分类号: TM53

文献标志码: A

**Abstract:** The advantages of metallized film capacitor are high energy density, reliability and low cost. The paper theoretically calculated the pressure between layers. Based on the theory of pressure induced by the liquid shrinkage, the paper analyzed the pressure changes before and after thermal treatment of metallized film capacitor. The results indicate that the pressures between layers descend from the inside to the outside of the capacitor. And the pressure after thermal treatment is 3 times of the pressure before treatment.

**Key words:** metallized film capacitor; heat treatment; pressure between layers

## 0 引言

自愈性是反映金属化膜电容器性能的重要特征之一<sup>[1]</sup>, 有自愈能力的聚丙烯金属化膜电容器以其成本低且体积小特点广泛应用于功率设备。金属化膜电容器的电极是由蒸镀到有机薄膜上的很薄一层金属(通常为铝或锌铝合金)组成, 其厚度仅为 20~100 nm。大量研究表明, 电容器电介质的电、热、化学特性对材料老化的影响与机械、电、热应力对材料的老化影响是相同的<sup>[1-8]</sup>。金属化膜电容器失效的原因之一, 就是其自愈不彻底或不能自愈, 而且电容器的内部压强对膜电容器的自愈能力有很重要影响。实际的电容器卷绕工艺决定了电容器内层压强

大, 外层压强小。文[9-11]建立的热动力模型认为, 自愈过程中电流的焦耳热功率急剧减小到一定时, 电弧熄灭, 实现自愈。同时, 焦耳热功率大小与加在膜上的压强有关, 无外加压强时焦耳热功率为  $10^{15}$  W/m<sup>3</sup>, 当压强提高到 0.5 MPa 时, 焦耳热功率值增加到  $1 \times 10^{17} \sim 2 \times 10^{17}$  W/m<sup>3</sup>。文[12]根据自愈铝等离子体放电发出射线证实等离子体密度随着膜上的压强增加而增加, 金属化膜电容器端部脱落也与膜层间压强相关。电容器制造的工艺选择、工艺参数的确定、工艺的流程等对电容器产品的最终质量有重要的影响。

## 1 膜电容器层间压强公式推导

液体内部相邻液体间相互作用表现为压力, 而液体表面相互作用表现为张力。液体表面收缩的倾向使液体具有表面张力, 液体表面张力是沿液体表面的切向力。相互作用的两部分液体间的表面张力总是和分界线垂直, 大小与分界线的长度成正比, 即表面张力表达式为<sup>[13]</sup>

$$f = L \quad (1)$$

其中  $f$  为液体表面张力;  $L$  为表面张力系数;  $L$  为液面分界线长度。

液体表面张力系数另一种定义是单位面积的液体表面能, 其表达式为<sup>[13]</sup>

$$L = E / S \quad (2)$$

式(2)中  $E$  为液体单位面积增加的表面能;  $S$  为液体单位面积。

弯曲液面能产生附加压强, 圆柱形液面产生附加压强计算公式为<sup>[13]</sup>

$$P = \gamma / R \quad (3)$$

式(3)中  $P$  为液面产生附加压强;  $R$  为圆柱液面半径。

金属化膜电容的卷绕过程由两片单面蒸镀的膜绕轴心卷绕而成, 其展开图见图 1。电容器元件套在

收稿日期: 2007-04-06; 修回日期: 2007-05-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(50437020)。

作者简介: 孔中华(1970-), 男, 博士研究生, 主要从事高电压技术的研究。

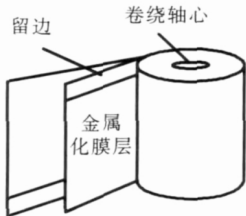


图 1 膜电容器展开图

卷绕机的主动转轴的轴心, 随轴心匀速转动, 转绕时薄膜的张力取决于从动轴与薄膜之间的摩擦力。从动轴与薄膜之间的摩擦力基本保持不变, 因此卷绕时薄膜的张力也基本保持不变。

金属化膜电容器使用的膜很薄, 一般是几个微米到十几个微米之间。当拉伸薄膜时, 薄膜产生收缩力, 收缩力的大小与膜的分界线长度成正比, 因此拉伸的膜像液体表面一样具有张力, 其拉力大小可以由式(1)表示。当拉伸的薄膜绕在圆形轴上时, 拉伸薄膜将产生收缩力, 薄膜的收缩力在圆筒上产生垂直于曲面的压强  $P$ 。此压强产生的原理与弯曲液面产生的压强原理相同, 都是由表面张力产生附加压强。为了计算热处理前后电容器元件的层间压强, 假定收缩的薄膜一圈一圈地套在圆轴上。

借鉴液体表面张力的定义, 拉伸的薄膜也如液体一样存在表面张力系数, 且存在表面能。假定拉力对薄膜做的功全部转化为薄膜的表面能, 则拉力对薄膜做的功为

$$W = f L \quad (4)$$

其中  $W$  为卷绕拉力做的功也等于拉伸薄膜的表面能;  $f$  为卷绕时的拉力;  $L$  是拉伸长度。

根据材料力学杨氏模量即弹性模量公式, 对于线性弹性材料有公式<sup>[14]</sup>

$$= E \frac{f}{hd} = E \frac{L}{2(r+nd)} \quad (5)$$

其中  $f$  为正应力;  $L$  为正应变;  $E$  为弹性模量与材料有关的常数;  $h$  为膜的宽度;  $d$  为膜的厚度;  $r$  为卷绕轴心的半径;  $n$  为卷绕膜的层数。

借鉴液体表面张力系数定义式(2), 可类似得出卷轴上每一圈薄膜的表面张力系数等于单位面积的表面能, 即为拉力做的功除以每一圈的表面积。

$$\frac{W}{S} = \frac{f L}{2(r+nd)h} \quad (6)$$

借鉴圆柱形液面产生附加压强式(3), 卷绕的薄膜的压强公式可以类似得出

$$P = \frac{f}{r+nd} = \frac{f L}{2 h(r+nd)^2} = \frac{f}{h^2 d(r+nd) E} \quad (7)$$

## 2 电容器层间压强计算实例

在计算实例中, 电容层元件样品选用厚度  $d$  为  $6 \mu\text{m}$ 、宽度  $h$  为  $70 \text{ mm}$  的聚丙烯膜, 卷绕轴心半径  $r$  为  $0.5 \text{ cm}$ 。卷绕机卷绕的拉力为  $5 \sim 5.5 \text{ N}$ , 计算时拉力  $f$  确定为  $5.25 \text{ N}$ , 电容器的层数确定为  $3000$  层, 计算每间隔  $300$  层的压力, 最里层确定为第  $1$  层。因为电容器卷绕成功后, 需要继续卷绕约为  $15$  层非

金属化光膜, 因此计算时最外层定为  $2985$ 。当金属化膜热处理后, 膜发生收缩, 使膜的层间压强增加。金属化膜电容器热处理的适宜温度约为  $85$ <sup>[15]</sup>。为了测定金属化膜热处理后的收缩率, 将金属化膜放在  $80$  烘箱中恒温保持  $4 \text{ h}$  (金属化膜电容器热处理时间为  $4 \text{ h}$ ), 测得  $5$  片金属化膜收缩率的平均值为  $0.58\%$ 。金属化膜在  $80$  热处理  $4 \text{ h}$  后, 根据塑料薄膜拉伸性能实验法 (GB 13022-1991) 测量金属化膜弹性模量。样品选用宽为  $1 \text{ cm}$ 、长为  $10 \text{ cm}$  的条形金属化膜, 膜的两边压有  $2 \text{ cm}$  的垫片, 中间薄膜的长度为  $6 \text{ cm}$ , 拉力计的最小刻度为  $0.01 \text{ mN}$ , 测量最小伸长量为  $0.01 \mu\text{m}$ , 拉伸速度为  $50 \mu\text{m/s}$ , 测量温度为  $20$ , 测量的拉力与膜的伸长量关系见图 2。根据图 2 的数据可以作两条拟合曲线。

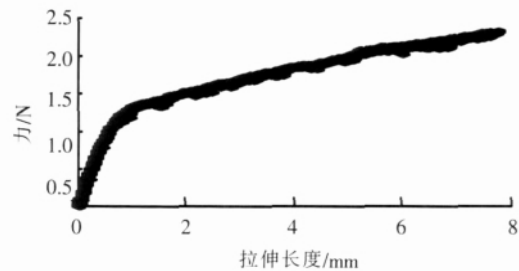


图 2 拉力与伸长量的关系

$$f = \begin{cases} 1.205.3 + 0.14704 L \\ 1.75 L \end{cases} \quad (f > 1.250 \text{ mN}, L > 1.026 \text{ mm}) \quad (8)$$

其中  $f$  为拉力;  $L$  为金属化膜的拉伸长度。

由式(8)可以得到金属化膜弹性模量公式

$$= \begin{cases} 2.0 \times 10^8 \text{ Pa} + 1.5 \times 10^8 \text{ Pa} \times \\ 1.9 \times 10^9 \text{ Pa} \times \end{cases} \quad (f > 1.250 \text{ mN}, L > 1.026 \text{ mm}) \quad (9)$$

假定金属化膜在层间压强下不发生形变, 则热处理前任意层间压强计算公式可由式(7)得到

$$P(n) = \frac{f^2}{h^2 d E} \sum_n \frac{1}{r+nd} \quad (10)$$

其中  $n$  为层数。

热处理后金属化膜电容器发生收缩, 相当于卷绕时, 膜的拉伸力增加, 增加拉力可由式(9)计算, 由于热处理收缩率为  $0.58\%$ , 可由式(9)中第 2 式计算出热处理后增加的拉力为

$$f_1 = 4.62 \text{ N} \quad (11)$$

则热处理后膜层间压强计算公式为

$$P(n) = \frac{(f + f_1)^2}{h^2 d E} \sum_n \frac{1}{r+nd} \quad (12)$$

对于  $3000$  层的膜电容器, 层间的压强作用在聚丙烯膜上使之发生形变, 这等效为卷绕的聚丙烯长度变长, 膜卷绕时拉力减小。为了计算方便, 聚丙烯膜拉伸弹性模量和压缩弹性模量都取相同值, 聚丙烯在正压强作用下的应变为

$$P=E \tag{13}$$

其中 P 为垂直于膜表面的压强; E 为弹性模量; 为聚丙烯的压缩正应变。

聚丙烯膜的泊松系数为<sup>[16]</sup>

$$\nu = \mu \tag{14}$$

其中 为卷绕聚丙烯拉伸正应变;  $\mu$  是泊松比, 在这里确定  $\mu$  为 0.35。

因此伸长的聚丙烯等效为膜的拉力减少

$$f_2 = E S \frac{P}{\mu} h d \tag{15}$$

把式(15)代入式(10)可得热处理前任意层间压强公式

$$P_n = \frac{f^2}{h^2 d E} \frac{1}{r+n d} + P_{n+1} - \frac{2 f P_{n+1}}{E h \mu} \frac{1}{r+n d} + \frac{P_{n+1}^2 d}{\mu E} \frac{1}{r+n d} \tag{16}$$

把式(15)代入式(12)可得热处理后任意层间压强公式为

$$P_n = \frac{(f + f_1)^2}{h^2 d E} \frac{1}{r+n d} + P_{n+1} - \frac{2(f + f_1) P_{n+1}}{E h \mu} \frac{1}{r+n d} + \frac{P_{n+1}^2 d}{\mu E} \frac{1}{r+n d} \tag{17}$$

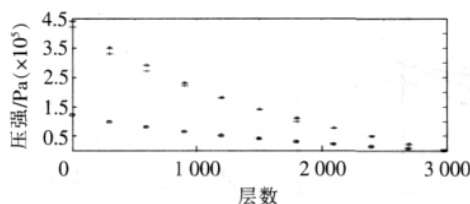
由 MATLAB 计算式 (10)、(12)、(16)、(17), 热处理前的弹性模量根据式(9)中第 2 式规定为  $1.9 \times 10^9$  Pa, 由文[17]查得聚丙烯弹性模量为  $2.1 \times 10^9 \sim 4.4 \times 10^9$  Pa, 这还是比较接近。计算结果见图 3, 文[18]研究金属化膜层间压强与自愈能量关系, 当没有外加压强, 其自愈能量为 275 mJ, 压强为  $3.44 \times 10^5$  Pa; 自愈能量为 6.2 mJ, 压强为  $1.72 \times 10^6$  Pa; 自愈能量为 1.6 mJ, 这说明计算结果还是可信。图 3 为热处理前后膜电容器层间压力计算结果。由图 3 可知, 热处理后层间压强是热处理前的 3 倍以上。考虑层间压强使金属化膜电容器发生形变的影响, 热处理后层间压强的影响大于热处理前的影响。膜电容器的层间压强由里向外递减。

### 3 结语

实际应用中膜电容器层间压强很难测量, 笔者借鉴液体表面张力产生附加压强的原理, 从理论上推导出膜电容器层间压强计算公式, 并计算出聚丙烯膜电容器元件层间压强大小, 由图 3 可知, 热处理后层间压强是热处理前的 3 倍以上, 膜电容器的层间压强由里向外递减。层间压强使金属化膜电容器发生形变, 对热处理后的影响大于热处理前的影响。

### 参考文献:

[1] AGARWAL V K. Aging of Multistressed Polymeric Insulators [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1989(24): 741-764.



注: “·”——热处理前 “o”——考虑层间压强热处理前  
“\*”——热处理后 “+”——考虑层间压强热处理后

图 3 热处理前后膜电容器层间压力计算结果

[2] REED C W, CICHANOWSKI S W. The Fundamentals of Aging in HV Polymer-film Capacitors[J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 1994(1): 904-922.

[3] SARJEANT W J, MacDOUGALL F W, LARSON D W, et al. Energy Storage Capacitors Aging and Diagnostic Approaches for Life Validation [J]. IEEE Trans. Mag, 1997 (33): 501-506.

[4] NASH J L. Biaxially Oriented Polypropylene Film in Power Capacitors[J]. Polymer Eng. Sci., 1988(28): 862-870.

[5] LEE Y D, PHILLIPS P J. The Electrically Ruptured Area of Cross-linked Polyethylene[J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1991 (26): 171-177.

[6] SANDEN B, ILDSTAD E. DC Electrical and Mechanical Characterisation of Polypropylene Film [J]. IEEE Intern. Conf. Conduction Breakdown in Solid Dielectrics, Vasteras, Sweden, 1998: 210-213.

[7] GADOUM A, GOSSE B, GOSSE J P. Accelerated AC Degradation of Impregnated PP Films[J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 1995(2): 1 075-1 082.

[8] SCHNEUWLY A, GRONING P, SCHLAPBACH L. Breakdown Behaviours of Oil-impregnated Polypropylene as Dielectric in Film Capacitor [J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 1998(5): 862-868.

[9] REED C W, CICHANOWSKI S W. The fundamentals of Aging in HV Polymer-film Capacitors[J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 1994(1): 904-922.

[10] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI N. Self-healing of Capacitors with Metallized Film Techndogy: Oxperimental Obserrations and Theoretical Model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(2): 159-169.

[11] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI N. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000: 674.

[12] TORTAI J H, BONIFACI N, DENAT A. Diagnostic of the Self-healing of Metallized Polypropylene Film by Modeling of the Broadening Emission Lines of Aluminum Emitted by Plasma Discharge[J]. Applied Physics, 2005, 97(5): 53.

[13] 黄淑清, 聂宜如, 申先甲. 热学教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.

[14] 杜庆华. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1957.

[15] 代新. 自愈式高储能密度脉冲电容器的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.

[16] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册(5)[K]. 北京: 中国标准出版社, 1989.

[17] 曲新喜. 现代有机介质薄膜 [J]. 电子元件与材料, 1993, 12 (1): 1-10.

[18] KAMMERNAIER J. Investigation of the Conversion Processes During Breakdowns in Capacitors with Metalized Dielectrics[J]. Frequency, 1964(18): 145-150.