

拉膜、镀膜工艺对圆元件外层中留边沿面击穿的影响分析

雷乔舒¹, 左强林^{1,2}, 郝宇¹

(1. 无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177; 2. 嘉善赛晶电容器有限公司, 浙江 嘉善 314112)

摘要: 本文通过对X厂家和Y厂家同规格金属化膜在相同工艺下制备的圆元件进行试验验证, 发现X厂材料制备的元件更容易发生“炸膜”现象, 最终明确“炸膜”现象与拉膜、镀膜工艺有一定的相关性。“炸膜”现象实为圆元件金属化膜外层中留边沿面击穿现象。通过对中留边沿面击穿的机理进行分析。首先, 中留边边缘极板电场畸变严重在低电压下放电, 会增加沿面击穿的风险; 其次, 中留边基膜表面的粗糙度和表面污秽的程度, 也会直接影响到中留边沿面击穿场强。针对“炸膜”现象提出改进措施, 如增加中留边宽度、优化蒸镀工艺, 调整电晕面的极性强度、优化屏蔽油涂刷工艺, 减小屏蔽油涂刷不均匀性等, 均可进一步降低沿面击穿的概率, 提升金属化膜质量。X厂家针对一定规格厚度薄膜进行工艺优化, 有效抑制了元件中留边沿面击穿的发生。

关键词: 金属化膜; 镀膜; 圆元件; 中留边; 炸膜; 沿面击穿

Analysis on the Influence of Film Drawing and Coating Processes on Edge Surface Breakdown in the Outer Layer of Circular Components

LEI Qiaoshu¹, ZUO Qianglin^{1,2}, HAO Yu¹

(1. Wuxi Sunking Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214177, China;

2. Jiashan Sunking Power Electronic Capacitor Co., Ltd., Zhejiang Jiashan 314112, China)

Abstract: In this paper, the experimental verification on circular components fabricated from metallized films of the same specifications from manufacturers X and manufacturer Y under identical process is performed, finding that the components prepared with materials from the former Manufacturer are more prone to the “film burst” phenomenon. Ultimately, it is confirmed that the “film burst” phenomenon has a certain correlation with the film drawing and coating processes. The “film burst” phenomenon is actually the edge surface breakdown occurring in the retained margin on the outlayer of the metallized film of the circular component. The mechanism of this edge surface breakdown in the retained margin is analyzed. First, the severe electric field distortion at the edge of the middle reserved edge plate leads to discharge at low voltages, which increases the risk of surface breakdown. Then, both the roughness of the surface of the base film of the middle reserved edge and the degree of surface contamination will also directly affect the surface breakdown field strength of the middle reserved edge. To address the “film burst” phenomenon, such improvement measures as increasing the width of the middle reserved edge, optimizing the evaporation process, adjusting the polarity and intensity of the corona surface, and optimizing the shielding oil brushing process as well as reducing the non-uniformity of the shielding oil brushing are proposed so to reduce the probability of surface flashover and improve the quality of the metallized film further. The former manufacturer has effectively suppressed the occurrence of surface flashover at the middle reserved edge of components by optimizing the process for films of a certain specification and thickness.

Keywords: metallized films; coating processes; circular components; central reserved area; film burst; surface breakdown

收稿日期:2026-03-18; 修回日期:2026-05-08

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

Project Supported by the National Key R & D Program of China(2021YFB2401504)。

0 引言

随着柔性直流工程国产化的需要,学者及其电容器厂商对柔性直流输电用直流支撑电容器的关注度越来越高,作为柔性直流换流阀的“心脏”元件,直流支撑电容器承担着电压支撑、能量缓冲和高频纹波抑制等关键功能,其可靠性直接决定了电网的稳定运行能力。金属化薄膜是直流支撑电容器的主要原材料,金属化膜可靠性导向问题引起了广泛的关注^[1-4]。电容器内部的圆元件通常由2层金属化膜(一对膜)围绕芯轴卷绕而成,再在元件端面喷金属镀层^[5-7]。这一对膜分为A膜和B膜,膜宽度是不一样的。对于内2串的金属化薄膜,通常在A膜中间留有白色的空带,称为中留边。中留边承受2串元件的电压,是通过在金属化膜蒸镀过程中用屏蔽油遮挡来形成的。

金属化薄膜电容器具有自愈性能特性,老化机理也与油浸式高压电容器有极大差异,李化等人针对干式金属化膜自愈性能问题进行大量的研究^[8-12],程璐等人对金属化膜的老化问题进行深入分析^[13-15],但鲜有论文针对内串金属化膜的中留边问题提出研究分析,本文针对某厂家提供的金属化膜材料,进行圆元件试验验证过程中出现的元件外圈中留边沿面击穿现象(俗称“炸膜”现象)进行分析,如图1所示。



(a) “炸膜”现象



(b) 沿面击穿现象

图1 元件外圈“炸膜”现象

Fig. 1 Film burst phenomenon on the outer rings of the component

“炸膜”通常发生在高温耐压,破坏性试验等极限场景中,发生“炸膜”的元件,通常在元件外层金属化膜1-2圈的区域,且在高温下更容易在低倍数额定电压下发生炸膜。元件一旦发生沿面击穿,会破坏薄膜的绝缘结构和电场分布,使其发生“炸膜”,容易导致直流支撑电容器故障,威胁柔性直流输电系统的安全。

本文从拉膜和镀膜工艺出发,分析“炸膜”产生的机理和影响因素,并提出相应的改进措施,对提升干式金属化膜电容器品质具有重要意义。

1 “炸膜”现象分析

1.1 “炸膜”现象分析

在相同工艺条件下,用X厂家和Y厂家同规格金属化膜卷绕的元件进行耐压验证时,X厂膜在常温和高温下90%元件出现外圈“炸膜”情况,Y厂膜均能正常通过。对X厂家另外一个厚度更厚的薄膜材料进行验证时,“炸膜”现象依然发生,且数量更多。

对X厂家部分击穿元件进行解剖可以发现,所谓的“炸膜”,就是A膜中留边绝缘沿面发生击穿,因沿面击穿处于元件外部,所以发出的声音大。沿面击穿与表面电场的不均匀有一定的关系^[16]。金属化膜中留边的电极结构很固定,但是金属镀层的厚度却有差异。文献^[17]表明,金属镀层厚度与方阻有关,方阻与金属镀层厚度的关系为

$$d_1 = \frac{1}{\gamma R_{\square}} \quad (1)$$

式中: d_1 为镀层厚度; γ 为镀层材料的电导率; $R_{\square}$ 为金属化膜的方阻。

从式(1)可以看出,镀层金属的电导率越大,导电性能越好,镀层越薄。金属化膜的方阻越大,镀层越薄,电场畸变越严重,而极板边缘的电场畸变最严重。特别是对于干式电容器,当局部场强达到3.0 kV/mm时^[18],残存的气隙就会放电,极板边缘一旦产生放电,中留边的沿面击穿电压就会迅速降低。当金属化膜的方阻曲线出现图2所示的曲线时,金属化膜中留边的沿面击穿就很容易发生。

1.2 中留边击穿面微观表征情况分析

为了更深入探究影响中留边附近发生电场畸变的原因,笔者对发生沿面击穿的元件金属膜表面中留边进行了微观形貌表征,具体如图3所示。

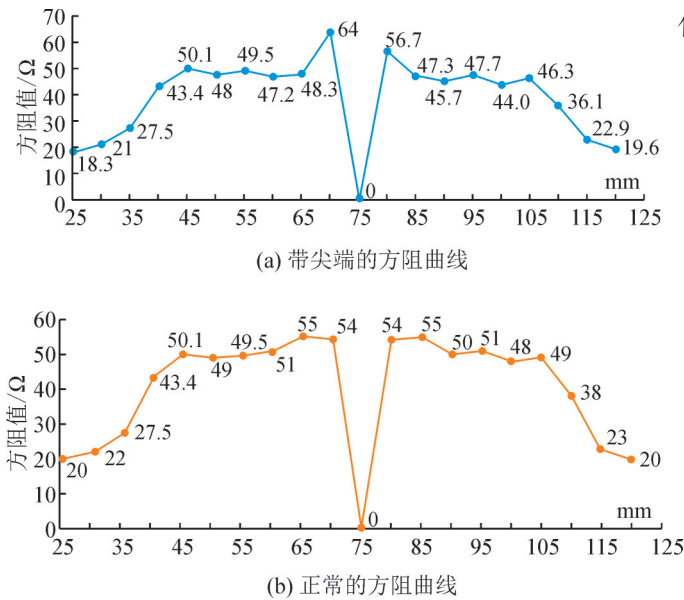


图2 容易发生沿面击穿的和正常的方阻曲线
Fig. 2 Surface breakdown-prone and normal sheet resistance curve

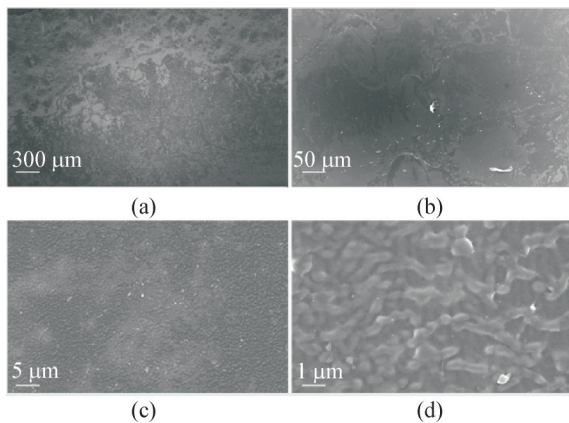


图3 沿面击穿处不同倍数的SEM图
Fig. 3 SEM images at different magnifications of the surface breakdown location

可以发现发生沿面击穿后,中留边的边缘处的金属镀层被腐蚀,其表面也有较多的杂质。从图3(d)可以看出,薄膜表面被腐蚀成一条条“沟壑”,说明薄膜表面被击穿,有大电流流过。为了探究杂质的具体来源,对薄膜表面进行了XRD元素分析,如图4-5所示。可以发现,沿面击穿处的表面分布着镀层金属的Al和Zn元素,从图5的对比图可以清晰的看出,沿面击穿的蒸镀金属元素不仅分布在杂质本身,其周围也有蒸镀金属元素存在,而正常中留边中的杂质,其蒸镀金属元素集中在杂质本身,不会对周围产生较大的影响,理论上中留边因为屏蔽油的遮挡,不会有金属蒸镀在表面,这里出现蒸镀金属元素的原因一是可能屏蔽油有杂质且未有效屏蔽蒸镀金属,二是薄膜本身杂质较多,三是中留边周围发生过较为强烈的自愈,导致金属镀层汽

化,通过气隙弥散到中留边处。

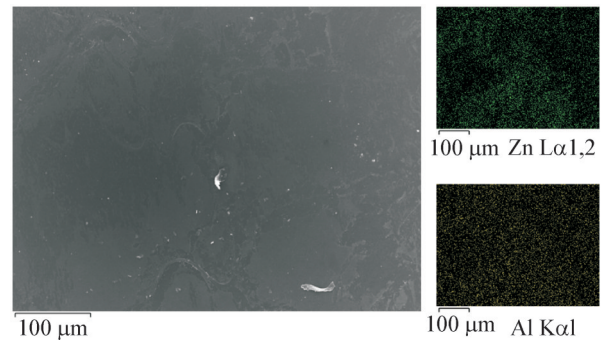
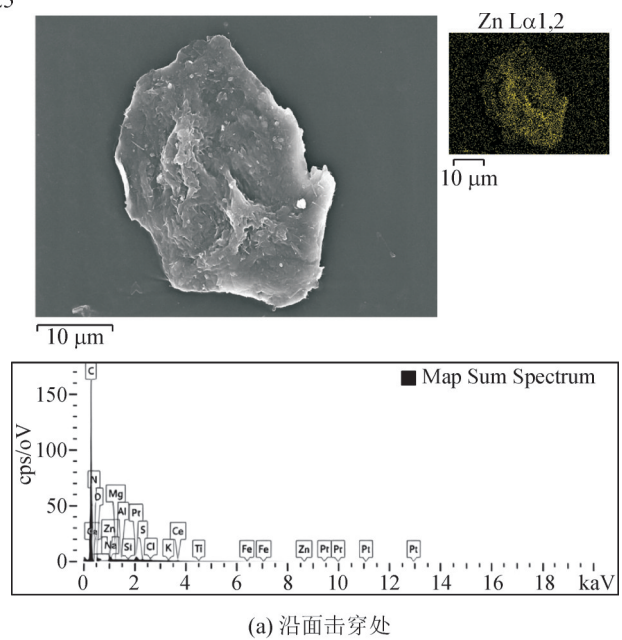
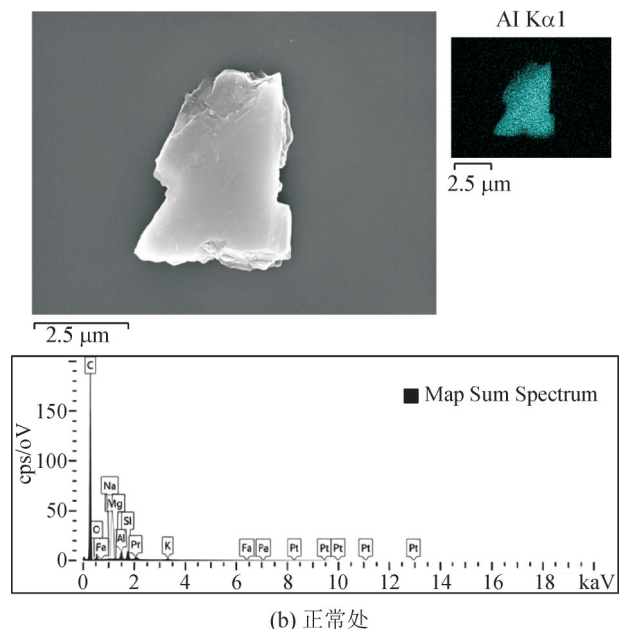


图4 沿面击穿处XRD元素分析
Fig. 4 XRD elemental analysis at the surface breakdown location



(a) 沿面击穿处



(b) 正常处

图5 杂质XRD元素分析
Fig. 5 XRD elemental analysis of impurities

2 “炸膜”现象的原因分析

从蒸镀金属层的源头开始分析其引入杂质和会导致电场畸变的环节,一是薄膜自身的表面情况,二是电晕处理工艺,三是中留边上屏蔽油的品质。将从以上3个方面分析沿面击穿产生的原因。

2.1 薄膜的表面状况

2.1.1 表面粗糙度

基膜在拉膜过程中,会使薄膜表面形成一定的结晶,形成不同的粗糙度,表面形成微小的凹凸不平的表面。表征薄膜粗糙度通常有3个参数^[19-21]:平均粗糙度 R_a 、不平度均值 R_m 、微观不平度 R_z 。 R_a 通过薄膜纵向和横向测试3个试样,每个试样6个点,计算表面凹凸值的算术和平均值^[22], R_m 是薄膜表面扫描图中凹凸表面峰顶至谷底高度的平均值,而 R_z 是峰顶至谷底高度的最大值。标准GB/T 13542.3中只对 R_a 有具体要求,对 R_m 、 R_z 并没有明确规定,实际上, R_z 值对薄膜介电强度最低值起决定性作用, R_z 值越低,薄膜介电强度最低值越小。 R_a 表征薄膜粗糙度的平均水平, R_a 越大,意味着薄膜凹凸表面数量越多或者凹坑深度越深,薄膜表面的均匀度越差,电晕后电场分布不均,且电晕后会造造成微观凸起结构高度的降低,使 R_z 进一步降低^[23],从而增加沿面击穿的风险。

2.1.2 表面污秽

表面污秽主要分为导电物质和不导电物质,对沿面击穿有主要影响的是导电物质,导电物质出现在中留边可以为电流提供导电路径,引发电场畸变,降低沿面击穿的起始电压,出现在镀层处可能会引发电弱点,降低元件质量,但是如果不导电物质也较多,其较高的灰密可以吸收更多的水分,更有利于导电物质的溶解,有效提升薄膜表面的电导率^[24-25],使得发生沿面击穿的电压降低,提升沿面击穿发生的概率。因此,要关注薄膜表面的清洁状态,降低杂质出现的概率,提升电场的均匀性,防止元件过早“炸膜”。

2.2 电晕处理工艺

聚丙烯属于非极性材料,但是基膜在蒸镀前需要进行电晕处理,电晕处理会产生大量的等离子体,与薄膜表面的分子链发生接枝等化学反应^[21]。电晕处理后,会出现部分极性官能团,电晕面就成了极性材料。电晕处理产生的极性官能团,是为了增加聚丙烯薄膜与蒸镀金属之间结合力,甚至与金属发生化学反应^[21-23]。材料的极性对于其沿面击穿

具有较大的影响。极性介质具有较大的介电常数,在电场作用下会发生明显的极化现象。极化过程中,介质内部会产生极化电荷,这些电荷的分布会影响沿面电场的分布。当电场分布不均匀时,容易在局部区域形成较高的电场强度,从而增加沿面击穿的风险。因此,电晕处理工艺是镀膜前处理工艺的关键工艺之一。

从电介质物理^[24]可以了解到,表征极性强度的参数是极化强度 P ,极化强度 P 与电场强度的关系为

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)E \quad (2)$$

式中: P 为介质的极化强度; ε_0 为真空介电常数; ε_r 为电介质的相对介电常数; E 为电场强度。

从式(2)可以看出,电介质的极化强度与电场强度成正比,与材料的相对介电常数成正比。也就是说,通过降低镀层边缘部分的电场强度,可以降低聚丙烯薄膜的极化强度;通过测量聚丙烯薄膜电晕处理前后的相对介电常数变化,可以得到中留边表面的极性强弱。从另一方面看,调整电晕处理的电场强度,可以改变电晕处理表面的极性强弱。

从电介质物理可知,电介质中的电通量 D 为: $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$ 。电通量 $D = \sigma_0$,代入式(2)可以得到

$$\sigma_0 = P + \varepsilon_0 E \quad (3)$$

式中, σ_0 为电容器极板上的电荷密度,其余同式(2)。

从式(3)可以看出,在电场强度不变的情况下,电容器极板上的电荷密度越大,意味着界面极化越大,中留边的沿面击穿概率越大。

电晕处理极性强弱,可通过湿润张力这个指标进行表征。湿润张力单位为毫米/米,是薄膜表面可润湿性和表面自由能高低的直接体现,湿润张力越大,越容易被测试混合液附着。湿润张力可通过附着能力的指标进行量化。

2.3 屏蔽油性能

金属化膜中留边的表面污秽还有可能是屏蔽油受到的污染。这个污染或来自于聚丙烯薄膜的静电吸附作用,或电极蒸镀时屏蔽油吸附的金属蒸汽等。如果屏蔽油的品质不行,在基膜表面扩散,会导致中留边的屏蔽油层变薄,屏蔽油扩散区域变大,导致出现方阻曲线出现尖端,如图2所示。

此外,蒸镀温度也会对接角产生影响。文献^[25-26]表明,液体表面张力与温度的关系为

$$\gamma = \gamma_0(1 - bT) \quad (4)$$

式中: γ 为在温度 T 下液体表面张力; T 为液体的

绝对温度; γ_0 为绝对零度下的液体表面张力, 与体系有关的经验常数; b 为随体系而变的常数, 与液体的临界温度 T_c 有关。

从式(4)可以看到, 随着温度升高, 液体的表面张力也会随之降低。这是因为随着温度升高, 液体分子的平均动能增加, 分子活跃程度和运动趋势增强, 液体的粘度也随之降低。这意味着随着温度升高, 屏蔽油与基膜的接触角会减小, 单位面积上的屏蔽油减小, 增加镀层的不可控性, 也容易导致中留边受到污染, 影响中留边的沿面电气强度。

冷却辊可以有效降低蒸镀面的温度, 如果基膜厚度增加, 冷却辊对蒸镀面的降温效果降低, 导致蒸镀面的温度升高, 进而影响蒸镀效果。因此基膜厚度增加, 应该考虑适当调整镀膜速度, 否则不仅会造成方阻曲线出现尖角, 还可能导致电弱点增加。

3 “炸膜”现象的改进措施

根据前面的分析, “炸膜”是在某种状态下中留边出现沿面击穿的一种表现。因此, 针对“炸膜”现象的改进措施, 首先就是要提高蒸镀质量, 其次才是增加绝缘裕度。如果蒸镀质量好, 金属化膜的自愈少, 中留边沿面击穿的概率就会大幅度减少。

3.1 适当增加中留边的宽度

避免中留边沿面击穿最有效的办法当然是增加中留边的宽度。但是增加中留边宽度等于减小元件的有效面积, 增加成本。这是一对矛盾, 需要综合考虑, 找到一个平衡点。根据文献^[27-28], 镀层边缘的电场畸变系数公式为

$$k_1 = A \sqrt{\frac{d_m}{d_1}} \propto \sqrt{d_{m1}} \quad (5)$$

式中: d_1 为镀层厚度, μm ; k_1 为极板边缘的电场不均匀系数; d_{m1} 为聚丙烯薄膜的厚度, μm 。

从式(5)可以看出, 镀层的电场畸变系数与膜厚的开平方成正比, 对于柔直电容器, 假设参考膜厚为 $4.3 \mu\text{m}$, 则由式(5)可以得到电场畸变系数与参考膜厚的关系为

$$k = k_1/k_0 = \sqrt{\frac{d_{m1}}{4.3}} \quad (6)$$

式中, k 为电场畸变系数与参考膜厚的畸变系数的比值。这个系数与中留边的宽度成正比, 本文把这个系数称为中留边的宽度系数。式(6)的计算结果如图6所示。

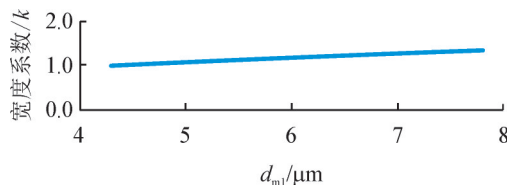


图6 中留边宽度系数与膜厚的关系
Fig. 6 Relationship between the margin width coefficient and the film thickness

从图6可以看出, 膜厚越大, 中留边的宽度越大。因此, 膜越厚, 中留边的宽度应该越大, 否则容易诱发中留边沿面击穿, 这也是在验证X厂家金属化膜, 膜越厚元件发生“炸膜”的频次越高的原因。

3.2 优化蒸镀工艺

3.2.1 优化前处理工艺

前处理工艺是镀膜工艺的关键工艺之一。前处理工艺的主要作用有: 调整电晕面的界面极化、消除基膜的静电、平衡蒸镀面的粗糙度等。

1) 调整电晕面的界面极化。对基膜进行电晕处理, 是镀膜的前提。电晕处理过程中, 电晕强度和电晕时间的控制至关重要。电晕强度与电晕放电功率成正比, 而间隙大小不一会导致单位面积上的放电功率不均, 影响浸润张力的一致性。此外, 膜面温度和空气相对湿度也是显著变量, 它们会影响电晕处理的效果和效率。

一般来说, 各个镀膜厂的镀膜工艺, 都是基于某个电晕处理工艺来制定的, 适宜范围较窄。为了增加镀膜工艺的覆盖面, 需要借助前处理工艺来调整来料的极性。这个极性用浸润张力来表征, 通常用达因值为单位。达因值越大, 镀层的结合力越大, 但是蒸镀过程中, 金属原子也会显得更“粘稠”, 很容易导致金属化膜镀层的一致性不好, 方阻不均匀; 达因值越小, 蒸镀的均匀性没有问题, 但是镀层的附着力越小, 难以满足要求。

2) 消除聚丙烯薄膜的静电, 清洁聚丙烯薄膜表面。前处理的核心目标是去除薄膜表面的杂质和氧化物等污染物, 确保镀层与基材的良好结合。杂质过多会影响蒸镀金属与薄膜表面的结合力, 以及影响蒸镀室的真空度。

3) 平衡蒸镀面的粗糙度。聚丙烯属于非极性聚合物, 表面能较低, 需采用适合高分子材料的电晕处理, 以提高表面润湿性和反应活性。经过电晕处理的聚丙烯薄膜, 会产生峰谷, 如图7所示。

图7中, 如果峰谷处带一定“尖角”的极性基团, 会导致镀层表面的不均匀性增大, 加剧金属原子累积, 导致镀层性能劣化。

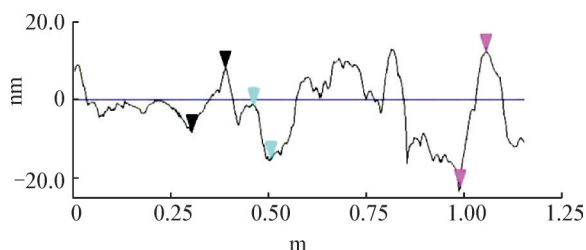


图7 电晕处理后薄膜表面产生的峰谷示意

Fig. 7 Schematic diagram of the peaks and valleys generated on the surface of the film after corona treatment

3.2.2 提高镀膜真空度

镀膜真空度是指镀膜室中的真空度。目前镀膜真空度一般在 10^{-3} mba(相当于 0.1 Pa)左右,真空度高的,可以达到 10^{-4} mba(相当于 0.01 Pa)左右。真空度越低,蒸镀室的氧气分子和水蒸气分子越多,对铝原子和锌原子的危害就越大,对金属镀层的危害也越大。根据文献^[25],空气密度与真空度的关系为

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (7)$$

式中: P 为镀膜室的气体绝对压强, Pa; M 为空气摩尔质量, 0.029 kg/mol; R 为通用气体常数, 8.314 J/(mol·K); T 为热力学温度, K。

标准条件下, 空气的密度 ρ_0 为 1.293 g/m³。在气体绝对压强 P 下, 单位体积的空气分子数为

$$N = \frac{\rho}{\rho_0} N_a = \frac{\frac{PM}{RT}}{\frac{P_1 M}{RT_0}} N_a = \frac{PT_0}{P_1 T} N_a \quad (8)$$

式中: N 为单位体积内的空气分子数; P_1 为标准大气压, 101.3 kPa; T_0 为参考温度 0℃, 273.15 K; N_a 为阿伏伽德罗常数, 6.02×10^{23} /mol。

考虑到空气中氧气的占比为 20.9%, 在气体绝对压强 P 的真空度下单位体积中, 氧分子的数量为 20.9% N 。

空气中单位体积的水蒸气分子数与空气的湿度有关, 要根据具体湿度和温度来计算。真空度越高, 蒸镀室中的氧分子和水蒸气分子的数量就越少, 铝原子和锌原子被氧化概率越低。

同理, 蒸镀室的真空度高, 蒸镀室内的杂质粒子数量也会越少, 镀层质量也会越好。中留边屏蔽油带受到的污染越小, 沿面的绝缘强度就越好。但是由于金属铝和金属锌的饱和蒸气压是一定的, 真空度越高, 被抽走的金属就越多, 对真空机组的危害就越大。蒸镀室的真空度达到 ($10^{-3} \sim 10^{-4}$) mba, 需采用三级泵或分子泵才能达到, 对真空室的要求也非常高。

3.2.3 匹配镀膜速度

从前面的分析可知, 镀膜室中在冷却辊上薄膜的温度主要由薄膜的行进速度来决定, 这个速度本文称之为镀膜速度。镀膜速度是镀膜工艺的关键参数之一, 对镀膜的生产效率、镀膜质量以及金属化膜的方阻都有极大的影响。

1) 镀膜速度越快, 单位时间的成膜越多, 生产效率也越高。也就是说, 在满足性能要求的前提下, 镀膜速度越快越好。

2) 镀膜速度越快, 薄膜在高温镀膜室内停留的时间越短, 薄膜受热越小, 温度对薄膜的损害越小。薄膜停留的时间越短, 屏蔽油的挥发也越少。

3) 镀膜速度越快, 蒸发舟的蒸发量要越大, 否则金属化膜镀层的方阻就难以保证。因此, 匹配镀膜速度对于镀膜质量极为关键, 需要深入研究, 与蒸发舟的蒸发量和蒸镀模具匹配, 确定最佳值。

3.3 其它工艺匹配

其它工艺匹配主要包括:

1) 优化屏蔽油涂刷工艺, 减小屏蔽油涂刷不均匀性。

2) 优化防氧化油的涂刷工艺。对于高方阻金属化聚丙烯薄膜, 由于其方阻较大, 镀层较薄, 稍有氧化, 就会导致其方阻迅速变大, 影响金属化膜质量。

3) 时效工艺。时效工艺就是时间、温度和湿度这 3 个参数的配合, 是在特定的条件下, 让金属原子与金属原子间形成稳定的金属键, 使金属镀层更加稳定。

3.4 控制分切间的温湿度

1) 湿度。湿度对极性介质沿面击穿有显著影响。极性介质容易吸附水分, 会导致介质表面电导率增加, 使沿面泄漏电流增大, 同时也会改变沿面电场分布, 降低沿面击穿电压。

2) 温度。温度的变化会影响极性介质的物理和化学性质, 进而影响沿面击穿特性。

4 结语

1) 通过对 X 厂家和 Y 厂家金属化膜在元件相同制备工艺条件下进行常温和高温下的耐压验证, 发现 X 厂家元件更容易发生外圈中留边沿面击穿现象, 俗称“炸膜”现象, 说明该现象与各金属化膜拉膜、镀膜工艺存在一定的关联性。

2) 经分析, “炸膜”与金属化膜中留边宽度有关, 与基膜的厚度、金属化膜镀层厚度及边沿电场畸变有关。另外, 通过扫描电子显微镜 (scanning

electron microscopy, SEM)查看中留边微观形貌表征,中留边分布有杂质及蒸镀金属元素,这也是影响“炸膜”的因素之一。薄膜表面粗糙度,表面污秽,都会影响薄膜表面的洁净度,增加“炸膜”的风险;电晕处理极性强度大,中留边沿面击穿的概率就高;屏蔽油因聚丙烯薄膜的静电吸附作用或电极蒸镀时吸附金属蒸汽受到污染,也会影响中留边的沿面电气强度。

3)X 镀膜厂家针对一定规格厚度的金属化膜,通过增加薄膜表面洁净度,优化电晕工艺及适当增加中留边宽度的正偏差等措施,有效降低了“炸膜”现象出现的概率,提升了直流支撑电容器的稳定性,以及降低直流支撑电容器的故障发生率,确保电力系统长期稳定运行。

4)建议金属化膜蒸镀时重点关注电晕面的极性强度、消除基膜的静电、平衡蒸镀面的粗糙度等前处理工艺,提高镀膜的真空度;另外,优化屏蔽油涂刷工艺,减小屏蔽油涂刷不均匀性、优化防氧化油的涂刷工艺,增加时效工艺及控制分切间的温湿度等,均可进一步降低沿面击穿的概率,提升金属化膜质量。

参考文献

- [1] YE Xuerong, HU Yifan, ZHENG Bokai, et al. Reliability assessment of film capacitors oriented by dependent and non-linear degradation considering three-source uncertainties[J]. Microelectronics Reliability, 2021, 126: 114277.
- [2] ZHAO Zhaoyang, DAVARI P, LU Weiguo, et al. An overview of condition monitoring techniques for capacitors in DC-link applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 3692-3716.
- [3] 吴云杰,张金保,赖伟,等. 基于金属化薄膜电容器状态在线监测的剩余寿命评估方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(22): 7239-7255.
WU Yunjie, ZHANG Jinbao, LAI Wei, et al. Remaining lifetime assessment method based on on-line condition monitoring of metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(22): 7239-7255.
- [4] 廖梓豪,王庚,李化,等. 柔直工程用直流支撑电容器缺陷分析与防护[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(6): 41-48.
LIAO Zihao, WANG Geng, LI Hua, et al. Defect analysis and protection of DC support capacitors for VSC-HVDC projects[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(6): 41-48.
- [5] 左强林,葛昌晶,雷乔舒. 卷绕工艺对直流支撑电容器圆元件膜层间压强的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 66-71.
ZUO Qianglin, GE Changjing, LEI Qiaoshu. Study on influence of winding process on inter-layer pressure of cylindrical element film in DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 66-71.
- [6] 赵子轩,左强林,雷乔舒,等. 直流支撑电容器圆元件膜层间压强在线测试与改进计算模型[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2268-2273.
ZHAO Zixuan, ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, et al. Online testing and improved calculation model for inter-layer pressure of circular elements in DC-link capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2268-2273.
- [7] 左强林,雷乔舒. 从物理过程分析镀层不同金属含量对金属化膜自愈能量的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 116-120.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Analysis on influence of different metal contents of coating layer on self-healing energy of metallized film from physical process[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 116-120.
- [8] 李化,易博思,李露,等. 直流支撑电容器用聚丙烯膜击穿和自愈特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3): 79-83.
LI Hua, YI Bosi, LI Lu, et al. Study on breakdown and self-healing properties of polypropylene film for DC-link capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3): 79-83.
- [9] 李化,章妙,林福昌,等. 金属化膜电容器自愈理论及规律研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 218-223.
LI Hua, ZHANG Miao, LIN Fuchang, et al. Study on theory and influence factors of self-healing in metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 218-223.
- [10] 张国豪,李化,林福昌,等. 金属化聚丙烯膜电容器自愈产气特性与保护技术[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 197-202.
ZHANG Guohao, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on self-healing gas generation characteristics and protection technology of metallized polypropylene film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 197-202.
- [11] 孙鑫博,邹白苏,王明,等. 金属化薄膜电容器失效研究现状[J]. 湖南电力, 2025, 45(6): 91-96.
SUN Xinbo, ZOU Baisu, WANG Ming, et al. Research status of metallized film capacitor failures[J]. Hunan Electric Power, 2025, 45(6): 91-96.
- [12] 王健涛,吴致远,王昕劼,等. 金属化膜击穿与自愈性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 102-107.
WANG Jiantao, WU Zhiyuan, WANG Xinjie, et al. Study on breakdown and self-healing performance of metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,

- 2024, 45(1): 102-107.
- [13]成庶,刘嘉文,伍珣,等. 基于特征提取与误差补偿的金属化薄膜电容器剩余寿命预测[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2672-2680.
- CHENG Shu, LIU Jiawen, WU Xun, et al. Residual life-time prediction of metallized film capacitors based on feature extraction and error compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2672-2680, 前插24.
- [14]李志元,王镜然,徐哲,等. 直流电压作用下金属化膜电容器的自愈特性及寿命预测[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2929-2937.
- LI Zhiyuan, WANG Jingran, XU Zhe, et al. Self-healing characteristics and life prediction of metallized film capacitor under DC voltage [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2929-2937.
- [15]刘刚,姚成,贾磊. 温湿度联合作用下金属化膜电容器的寿命预测[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 35-39.
- LIU Gang, YAO Cheng, JIA Lei. Life prediction of metallized film capacitor under the combined action of temperature and humidity[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 35-39.
- [16]李健,周军,黄瑞平,等. 沿绝缘表面空气间隙击穿特性的试验研究[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 1-6.
- LI Jian, ZHOU Jun, HUANG Ruiping, et al. Experimental study of the breakdown characteristic of the air gap along dielectric surface[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 1-6.
- [17]董琦,李浩林,党智敏. 电容器用高方阻金属化薄膜电极设计、解析与性能调控[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 128-139.
- DONG Qi, LI Haolin, DANG Zhimin. Design analysis and performance regulation of high square resistance metallized dielectric film electrode for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 128-139.
- [18]李志刚,程立,汪家春,等. 典型放电气体的击穿场强阈值研究[J]. 发光学报, 2017, 38(1): 103-108.
- LI Zhigang, CHENG Li, WANG Jiachun, et al. Field strength threshold of common discharge gases breakdown [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(1): 103-108.
- [19]蒋兴良,陈爱军,张志劲,等. 盐密和灰密对110 kV复合绝缘子闪络电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 150-154.
- JIANG Xingliang, CHEN Aijun, ZHANG Zhijin, et al. Effect of both salt and non-soluble deposit densities on flash-over voltage of 110 kV composite insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 150-154.
- [20]张永记. 不同盐/灰密下普通绝缘子串交流闪络特性的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2006.
- [21]DING L. P., ZHANG X. Y., WANG Y. Q., et al. Study on the behavior of BOPP film treated by corona discharge[J]. Coatings, 2020, 10(12): 1106-1195.
- [22]方文彬. 电晕对BOPP薄膜表面化学组成和表面张力的影响研究[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(3): 55-56.
- FANG Wenbin. The effect of corona on the surface chemical composition and surface tension of BOPP film[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(3): 55-56.
- [23]NUNTAPICHEDKULB, TANTAYANONS, LAOHASURAYOTIN K. Practical approach in surface modification of bi-axially oriented polypropylene films for gravure printability [J]. Applied Surface Science, 2014, 314: 331-340.
- [24]陈季丹,刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
- [25]张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.
- [26]沈文琪. 全膜介质电容器真浸过程中浸渍剂在层间的动态分析[J]. 电力电容器, 1987, 8(3): 22-31.
- [27]梅中原,史海洋,付大志. 高压电力电容器极板边缘电场的简易计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(1): 10-13.
- MEI Zhongyuan, SHI Haiyang, FU Dazhi. Simple calculation of electric-field at the foil edge in high voltage power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(1): 42-50.
- [28]麻森. 高压并联电力电容器边缘电场的有限元计算[J]. 电力电容器, 1987(2): 24-32.
- MA Sen. Finite element calculation of the electric field at the edge of high-voltage parallel capacitor plates[J]. Power Capacitor, Apr, 1987(2): 24-32.

作者简介:

雷乔舒(1979—),女,高级工程师,主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail:leijs@sunking-tech。

左强林(1967—),男,正高级工程师,主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail:zuoql@sunking-tech.com。

郝宇(1998—),男,助理工程师,主要从事电力电容器的单元设计工作。E-mail:haoy@sunking-tech.com。