

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.04.003

直流支撑电容器对壳局放性能的影响因素分析

左强林, 何冰辉, 黄杰, 倪琰

(嘉善赛晶电容器有限公司, 浙江 嘉善 314112)

摘要: 本文分析了聚氨酯胶的基本性能参数介电常数、电导率和损耗角正切对直流支撑电容器对壳交流局部放电性能的影响规律;分析了温度对聚氨酯固化化学反应的影响机制及剩余生胶比例的影响;分析了聚氨酯主剂中官能团没有完全反应存在的问题;结合巴申定律分析计算了注胶真空度对电容器局部放电影响的规律;阐述了用于直流支撑电容器的双组分聚氨酯胶的三种固化工艺:高温固化、常温固化和混合固化,对聚氨酯胶的性能的影响。得到了聚氨酯的基本性能参数变化对电容器局放稳定性的影响机制和温度对直流支撑电容器影响的机制,提出了聚氨酯的固化温度越低,聚氨酯固化的均一性越差,对壳局放及其稳定性越差的结论;获得了注胶真空压强越高,微气隙的击穿场强越高的推论;提出聚氨酯的基本性能参数不能出现突变的建议。

关键词: 聚氨酯; 直流支撑电容器; 局部放电; 巴申定律; 固化反应

Analysis of Factors Influencing the Partial Discharge Performance of DC-link Capacitor to the Case

ZUO Qianglin, HE Binghui, HUANG Jie, NI Yan

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

Abstract: In this paper, the influence of such basic performance parameters of polyurethane (PU) adhesives as dielectric constant, conductivity, and tangent of loss angle on the AC partial discharge performance of DC-link capacitors to the case is analyzed. The influence of temperature on the curing reaction of polyurethane and the effect of residual uncured rubber are also analyzed. The problem of incomplete reaction of functional groups in PU main agent is analyzed. The influence of the vacuum degree of injection on the partial discharge of the capacitor is calculated in combination with the Paschen's law. Such three curing processes of two-component PU adhesives for DC-link capacitors as high-temperature curing, normal temperature curing, and mixed curing and their influence on the performance of PU adhesives are described. The influence mechanism of the changes in the basic performance parameters of PU on the stability of capacitor partial discharge and the influence mechanism of temperature on DC-link capacitors are obtained. It is concluded that the lower the curing temperature of PU, the worse the uniformity of PU curing, and consequently the worse the case partial discharge performance and its stability. It is inferred that the higher the vacuum pressure during potting, the higher the breakdown field strength of micro-voids. The suggestion that the basic performance parameters of PU should not exhibit abrupt changes is proposed.

Keywords: polyurethane ; DC-link capacitor; partial discharge; Paschen's law; curing reaction

0 引言

聚氨酯的应用场合很多,主要有生物^[1-2]、建筑^[3]、

交通^[4]、煤矿^[5]、体育等领域^[6-7]。聚氨酯胶也是目前直流支撑电容器的主流灌封介质。电容器中聚氨酯胶的主要作用有导热、阻燃、隔绝空气和加强对

收稿日期:2026-04-02; 修回日期:2026-06-23

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)。

壳绝缘。典型的双组分聚氨酯胶包括两个部分:主剂和固化剂^[8-9]。主剂一般为多元醇,固化剂为异氰酸酯^[10]。真正用于生产实际的聚氨酯没有那么简单。从固化剂反应比例分,聚氨酯有固化剂过量和欠量2种。本文把前者称为过量聚氨酯,后者称为欠量聚氨酯。固化剂过量会导致材料内部产生过多的交联点,限制了分子链的运动,从而影响了材料的柔韧性和回弹性^[11]。为了满足电容器对壳局放的要求,用于直流支撑电容器灌封材料的,都是欠量聚氨酯。欠量反应意味着存在未发生化学反应的主剂,本文把它称为生胶。固化剂欠量会导致材料的机械强度、耐化学品性能和耐热性能不佳。但这些物理性能对电容器的应用场合没有影响。欠量反应的关键优点是混胶粘度小,胶液渗透性好,对局放有利;胶体固化后硬度小,对元件的危害小。

聚氨酯胶为极性介质,其分子内部存在永久偶极矩,在电场作用下分子会重新排列,导致介电常数增大^[12]。聚氨酯胶的电气绝缘性能良好,但介电强度相对较低,且易受温度影响,高温环境下其介质损耗可能显著增加,绝缘电阻显著降低^[12]。典型聚氨酯胶的基本性能参数如表1所示。为了便于理解,笔者把电容器行业比较熟悉的BOPP聚丙烯薄膜的相关参数放在表1中。

表1 聚氨酯胶的基本性能参数
Table 1 Basic performance parameters of PU adhesive

指标名称	参考值	检测方法	聚丙烯薄膜
线膨胀系数 (50℃~60℃)/(10 ⁻⁶ /K)	190~220	GB/T 36800.2	~200
体积电阻率/(Ω·cm)	>1.0×10 ¹²	GB/T 1410	>1.0×10 ¹⁶
工频相对介电常数	4~10	GB/T 1409	2.2±0.2
介电强度/(kV/mm)	>15	GB/T 1408.1	中值>190

从表1可以看出,聚氨酯胶的电阻率比聚丙烯薄膜低4个数量级;相对介电常数比聚丙烯薄膜大几倍;介电强度不到聚丙烯薄膜的1/10。

聚氨酯的固化工艺^[13-15]对于聚氨酯的性能具有决定性的影响。聚氨酯固化后体积会收缩2%左右,这个指标对电容器对壳局放的影响很重要^[16-17]。

本文将从聚氨酯的基本性能参数、温度、注胶工艺和固化工艺等方面,分析影响电容器对壳局放的因素,剖析影响机理,以期提升电容器的对壳局放性能。

1 聚氨酯的基本性能参数对局部放电的影响

1.1 极性介质对电容器局放影响概述

文献[12]表明,在复合介质中,电场强度按介电

常数反比分布,即:

$$\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2 \tag{1}$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 分别为介质1和介质2的相对介电常数; E_1 、 E_2 分别为介质1和介质2中的电场强度。

极性介质介电常数较高,在交流电压下,电场强度按介电常数成反比分配,可能导致局部场强集中,引发局部放电。从式(1)可以看出,电介质的极性越强,其相对介电常数越大,场强越小。也就是说,只要介质中存在介电常数的差异,就会存在界面电荷,存在空间电荷效应和电场畸变,容易诱发局部放电,甚至导致介质击穿。此外,极性介质对温度更敏感,温度升高会使极性介质的介电常数和损耗发生变化,进一步影响局部放电特性,高温可能降低其绝缘性能。极性介质和非极性介质的介电参数对比如表2所示。

表2 极性介质与非极性介质的介电参数对比
Table 2 Comparison of dielectric parameters between polar and non-polar dielectrics

参数名称	极性介质	非极性介质
介电常数	较大	较小
介质损耗	较大	较小且热稳定性好
电气强度	相对较低	较高,适用于高温高压环境
热稳定性	较差	稳定

从表2可以看出,极性介质的介电常数高、损耗大、热稳定性较差,更容易引发和加剧局部放电,进而影响电容器的对壳绝缘性能,甚至运行安全。

1.2 介电常数对电容器对壳局部放电的影响分析

电容器对壳局放产生的前提是聚氨酯胶体中存在残存的气体,这部分气体可能会以气泡的形式存在^[18-20]。一般而言,如果采用真空注胶工艺,这部分气泡的pd值满足巴申定律。根据文献^[21],这部分气泡属于微气隙,微气隙在这种情况下不会发生放电。假设介质1为空气,介质2为聚氨酯,则气隙中的场强为

$$E_1 = \epsilon_2 E_2 \tag{2}$$

根据表1,典型聚氨酯的相对介电常数为4~6,则气隙中的场强达到聚氨酯中场强的4~6倍。正常情况下,电容器对壳场强不高,在交流电压下微气隙不容易发生放电。随着温度变化,作为极性介质的聚氨酯,其相对介电常数可能会快速增大,导致微气隙中的场强快速变化,有可能引发气泡放电,导致电容器对壳局部放电增大。某款聚氨酯胶的相对介电常数与温度的关系如图1所示。

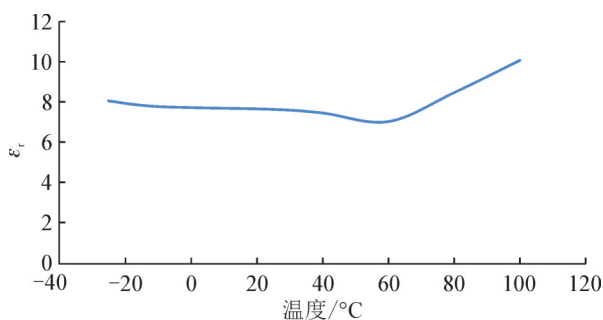


图1 聚氨酯的相对介电常数与温度的关系

Fig. 1 Relationship between the relative dielectric constant of PU and temperature

从图1可以看出,该款聚氨酯胶的介电常数偏大,且在60℃附近迅速增大的趋势,这会导致气泡中的场强迅速增大,很容易诱发气泡放电,电容器对壳局放性能不好。实践证明,用这款聚氨酯胶生产的电容器,对壳局放性能不好。

另外,由于电容器在运行过程中各个部位的温度是不一样的,如果某个温度点介电常数存在快速变化,很容易形成界面力,造成空间电荷积累,进一步恶化电容器对壳局部放电性能^[22]。因此,聚氨酯胶的介电常数-温度特性不能存在快速变化现象,特别是在电容器运行的高温区。

1.3 电阻率对电容器对壳局放的影响

电容器对壳局放是在交流电压下的局放,按道理应该与电阻率没关系。但是如果电阻率存在突变或骤降,就会存在问题,如图2所示。

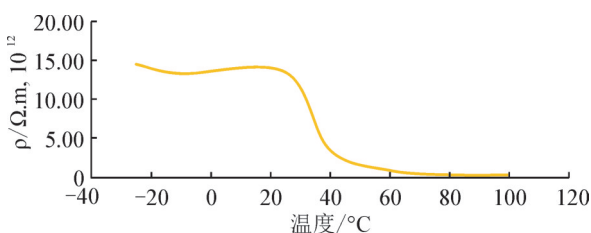


图2 聚氨酯的体积电阻率与温度的关系

Fig. 2 Relationship between the volume resistivity of PU and temperature

从图2可以看到,该款聚氨酯胶的体积电阻率在20℃~40℃之间有一个快速变化区。这个变化区有可能导致空间电荷集聚,影响电容器的对壳局放性能。根据文献^[12],在直流电压下,电介质中的电导电流连续,即

$$\gamma_1 E_{d1} = \gamma_2 E_{d2} \quad (3)$$

式中: γ_1 、 γ_2 分别为介质1和2的体积电导率; E_{d1} 、 E_{d2} 分别为介质1和2中的直流电场强度。

从式(3)可以看出,如果聚氨酯的电导率出现骤降,其电场强度就会剧增,可能会导致空间电荷集聚甚至导致胶体本身受伤,危害电容器的运行安

全。实际上,电容器在运行过程中,处于对壳绝缘的聚氨酯胶体,会长期承受直流电压的作用,而且20℃~40℃的温度范围在运行过程中是客观存在的。因此,这种聚氨酯不适用于干式电容器。

另一方面,假设介质1为空气,介质2为聚氨酯胶体,由于空气的电导率比聚氨酯的大几个数量级,则空气中的直流电场强度几乎可以忽略不计。也就是说,在直流电场下,聚氨酯中几乎不会产生局放,这应该也是直流支撑电容器对壳局放采用交流局放来检测聚氨酯浇注质量的根本原因。

1.4 损耗角正切对电容器局部放电的影响

根据文献^[12],电介质的损耗角正切与其电导率和介电常数的关系为

$$\tan \delta = \frac{\gamma}{\omega \epsilon} \quad (4)$$

式中: $\tan \delta$ 为聚氨酯的损耗角正切; γ 为聚氨酯的体积电导率; ϵ 为聚氨酯的介电常数; ω 为测试电压的角频率。

从式(4)可以看出,聚氨酯的损耗角正切与其电导率成正比,与其介电常数成反比。聚氨酯的损耗角正切对电容器局部放电的影响,是其介电常数和电导率影响的综合体现。

某型号聚氨酯胶的损耗温度曲线如图3所示。

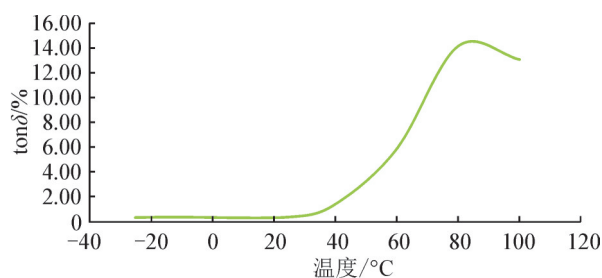


图3 聚氨酯的损耗角正切与温度的关系

Fig. 3 Relationship between the tangent of the loss angle of PU and temperature

从图3可以看出,聚氨酯的损耗角正切在20℃以下是很平缓的,几乎没有随温度变化,但在30℃左右开始迅速增大,在80℃时达到顶峰。30℃~80℃是电容器运行时间最长的温度区间,在这个区间内,损耗随温度上升而急剧增大,不仅会导致电容器的对壳局放不稳定,还会引起对壳温升增大,进一步恶化电容器的运行环境。实践证明,采用这款聚氨酯胶生产的电容器,对壳局放性能不能满足要求。

2 温度对电容器局部放电的影响

2.1 对化学反应的影响

温度除了通过聚氨酯的基本性能参数对电容

器局部放电产生影响外,温度本身也会对电容器局部放电直接造成影响。包括两个方面:对化学反应本身的影响和对生胶余量的影响。

电容器用聚氨酯的化学活性由其官能度和温度^[21,23~24]决定。电容器用聚氨酯属于聚醚多元醇,其官能团为羟基(-OH),官能度为 $f=2\sim3$ 。也就是说,其主剂一般由3官能团和2官能团的聚醚多元醇按照一定的比例混合而成,固化剂中含有异氰酸酯基团(-NCO),两者发生化学反应形成聚氨酯胶体。化学反应的速度主要由官能团的活性决定,温度越高官能团的活性越强。一般而言,3官能团的活性比2官能团的活性强。对于官能度为 $f=2\sim3$ 的低官能度多元醇,不能加入端氨基-NH₂,否则可能会产生缩聚^[24]反应,产生水,增加胶体的微水含量,影响电容器的局放性能。端氨基主要用于高官能度多元醇的交联,提高固化胶体的强度。在低官能度或不需要交联的聚氨酯中,不应该加入端氨基。

对于常温固化的聚氨酯,通常来说,其固化反应的典型温度从30℃降到10℃,反应选择性差异的核心在于,在30℃下固化反应为化学动力学主导的相对均相反应,而在10℃下转变为扩散过程主导的非均相、局部化反应。具体温度与各个厂家的配比有关。这个配比包括固化剂和主剂的配比,也包括主剂中3官能度成分与2官能度成分的配比。需要注意以下几方面:

1)如果聚氨酯的临界工艺下限是10℃,虽然10℃下反应最终也能进行并形成固体,但胶体的材料性能与30℃产物有质的不同,且通常出现发粘、强度低和不均匀等不良现象,需要想办法解决。

2)必须采取控温措施。聚氨酯的固化反应,理想的反应温度应保持在(20~30)℃。如果环境温度只有10℃,必须对原料,特别是电容器用多元醇组合料,进行预热至(20~30)℃,再与同样预热的固化剂混合。混合后,最好能在保温环境下(如保温箱等)进行初始固化。

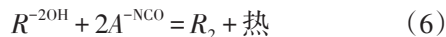
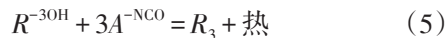
3)如果环境温度在10℃以下,应该考虑加催化的固化工艺。催化剂是解决低温固化问题最有效、最经济的方法。加入少量有机锡催化剂,可以大幅度缩短在10℃下的固化时间^[25]。但是使用催化剂,会缩短混胶的可用时间,对注胶工艺有极大的影响,需要重新设计注胶工艺。

4)关注填料沉降。在10℃下,更长的低粘度期和更高的初始粘度都会加剧填料的沉降。填料的沉降对于聚氨酯胶的固化影响极大,会导致不均匀固化,对电容器对壳局放影响很大,特别是在温度

突然降低时。

2.2 对生胶余量及比例的影响

3官能团和2官能团的多元醇与固化剂中的异氰酸酯基团(-NCO)的化学反应方程式如式(5)-(6)所示。



式中: R^{-3OH} 为3官能团多元醇; R^{-2OH} 为2官能团多元醇; A^{-NCO} 为固化剂; R_3 、 R_2 分别为3官能团和2官能团多元醇固化后的聚氨酯胶体。

前面分析过,电容器用聚氨酯采用欠量聚氨酯,固化反应完成后仍有生胶。生胶的比例对电容器对壳局放有影响,而且会影响较长时间。

从式(5)-(6)可以看出:聚氨酯的固化反应会产热,固化工工艺要考虑这个因素。3官能团的多元醇1个分子消耗3个固化剂分子,2官能团的多元醇1个分子消耗2个固化剂分子。根据式(5)-(6),对于欠量聚氨酯,剩余的生胶量在式(5)和式(6)之间。下限全部按式(5)反应,上限全部按式(6)反应。假定式(5)的反应速度为 v_1 ,式(6)的反应速度为 v_2 。则有

$$a_1 = 3v_1t + 2v_2t \quad (7)$$

式中: a_1 为固化剂的摩尔分子数; v_1 为3官能团的反应速度, mol/s; v_2 为2官能团的反应速度, mol/s; t 为反应时间, s。

由式(7)可以得到

$$t = \frac{a_1}{3v_1 + 2v_2} = \frac{a_1}{v_1(3 + 2\alpha)} \quad (8)$$

式中, $\alpha = v_2/v_1$ 为2官能团的反应速度与3官能团的反应速度比。

假设聚氨酯主剂中3官能团的摩尔分子数为 a_3 ,2官能团的摩尔分子数为 a_2 。则固化后的生胶量分别为

$$a_{3y} = a_3 - v_1t \quad (9)$$

$$a_{2y} = a_2 - v_2t \quad (10)$$

式中: a_{3y} 为3官能团的摩尔分子数; a_{2y} 为2官能团的摩尔分子数。其余同式(8)。

将式(8)代入式(9)-(10)中可以得到

$$a_{3y} = a_3 - v_1 \frac{a_1}{v_1(3 + 2\alpha)} = a_3 - \frac{a_1}{3 + 2\alpha} \quad (11)$$

$$a_{2y} = a_2 - v_2 \frac{a_1}{v_1(3 + 2\alpha)} = a_2 - \frac{\alpha a_1}{2\alpha + 3} \quad (12)$$

假设3官能团多元醇的分子量为 m_3 ,2官能团多元醇的分子量为 m_2 ,固化剂的分子量为 m_1 。根据

文献,如果某一物质的分子量为 m ,则1 mol 该物质的分子数为 N_a (阿伏伽德罗常数,为 6.022×10^{23}),重量为 m 克。这样可以得到固化前后聚氨酯的相关参数计算方法,如表3所示。

表3 固化前后各物质的摩尔分子数和重量变化
Table 3 Changes in mol molecular numbers and weights of each substance before and after curing

物质	3官能团多元醇	2官能团多元醇	固化剂
固化前			
摩尔数	a_3	a_2	a_1
分子量	m_3	m_2	m_1
质量/g	$M_3 = a_3 m_3 / N_a$	$M_2 = a_2 m_2 / N_a$	$M_1 = a_1 m_1 / N_a$
固化后			
摩尔数	a_{3y}	a_{2y}	0
质量/g	$M_{3y} = a_{3y} m_3 / N_a$	$M_{2y} = a_{2y} m_2 / N_a$	0

由于化学反应的速度很难确定,为了分析方便,引入相对值来分析。令剩余多元醇的比例为 β ,3官能团生胶的比例为 γ 。即:

$$\beta = (M_{3y} + M_{2y}) / (M_3 + M_2) \quad (13)$$

$$\gamma = M_{3y} / (M_{3y} + M_{2y}) \quad (14)$$

将相关数据代入式(13)–(14),可以得到图4–5所示曲线。图4中,实线 M_{2y} 为2官能度多元醇生胶量,点划线 M_{3y} 为3官能度多元醇生胶量。图5中,实线 β 为多元醇生胶比例,点划线 γ –3为3官能度生胶比例。

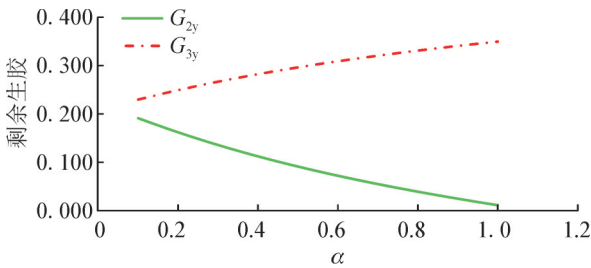


图4 生胶相对值与反应速度比的变化关系
Fig. 4 Variation relationship between the relative value of raw rubber and the reaction rate ratio

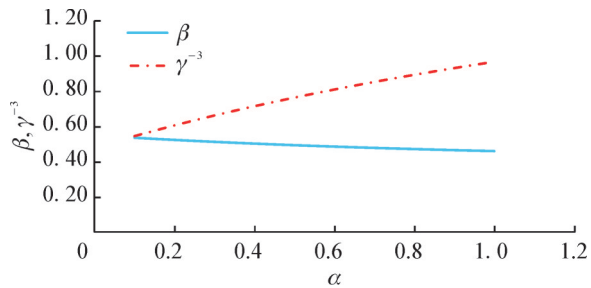


图5 剩余生胶比例与反应速度比的关系
Fig. 5 Relationship between the proportion of remaining rubber and the reaction rate ratio

从图4可以看到,随着2官能团的化学反应相对速度增加,2官能团的剩余生胶量减小,3官能团

的剩余生胶量增加。

从图5可以看出,随着 α 增大,剩余生胶比例缓慢减小,其中3官能度生胶的比例增大。由于3官能度多元醇的活性较强,剩余生胶中3官能度多元醇的比例增加,可能会导致电容器对壳局放性能不稳定。原因如下:

1) 剩余生胶比例降低,在温度降低的情况下,可能会导致局部开裂,影响电容器的对壳局放性能,出现局放不稳定。即使温度不降低,由于生胶比例小,固化胶体固化后密度增大,生胶难以弥补聚氨酯固化带来的局部体积缩小,也会导致电容器对壳局放不稳定。

2) 由于温度降低,聚氨酯的活性和流动性都不足,固化反应自身的活性不足,反应存在不均一性。如果在此过程中移动电容器或对聚氨酯施加电压,有可能会造成难以弥补的后果。更有甚者,由于周围的固化剂摩尔数不足,会存在主剂的官能团不完全反应。未发生化学反应的官能团属于带电粒子,必然导致电容器对壳局放性能不稳定。随着存放时间延长,带电官能团可能会导致电容器对壳局放不稳定。随着周围环境温度增加,这种带有缺陷的聚氨酯中,官能团的活性增大,也会导致电容器对壳局放不稳定。

需要指出的是,上述分析仅仅是理想情况下的纯理论定性分析,实际使用过程中,远比上述分析复杂,需要做大量的应用性试验。

3 注胶工艺对电容器局部放电的影响

3.1 注胶工艺的影响

注胶工艺目前主要有2种:真空注胶和非真空注胶。注胶工艺对电容器局部放电的影响,主要是气泡的数量和大小。文献^[21]把电容器中的气隙分为一般气隙和服从巴申定律的微气隙,本文仍然采用这个说法。

为了便于分析注胶工艺的影响,需要2个基本假定:一是假定注胶过程中形成的气泡数量和尺寸是基本一样的;二是假定气泡的体积满足 $V = ad^3$ 。其中 a 为常数, d 为气泡的关键尺寸。根据文献^[21],对于真空注胶,聚氨酯中的气隙大多属于微气隙,本文不做分析。本文主要分析一般气隙,即气泡。对于非真空注胶,肯定会存在较多的气泡。对于非真空注胶,一般气泡的压强就是大气压 P_1 ;对于真空注胶,气泡的压强为注胶时的真空气压 P_2 ,破空后气泡的压强回到大气压强,其体积的变化关系如表4所示。表4中 $\alpha = P_1 / P_2$ 。

表4 不同注胶工艺气泡内体积和pd值变化情况
Table 4 Variation in bubble volume and pd value under different injection molding processes

注胶工艺	出罐前气泡压强	出罐后气泡压强	出罐后体积变化	出罐后pd值	气泡中的场强	气泡击穿场强
非真空注胶	P_1	P_1	V_1	$P_1 d_1$	$E_1 = \varepsilon_r E_0$	2.2
真空注胶	P_2	P_1	V_1/α	$\frac{P_1 d_1}{\alpha^{2/3}}$	$E_1 = \varepsilon_r E_0$	E_{1b}

从表4可以看到,采用非真空注胶工艺,气泡的pd值较大,不属于微气隙,气泡中的击穿场强为2.2 V/ μm 。以3.0 kV对壳绝缘厚度计算,端子对壳场强在(0.3~0.5) V/ μm ,典型聚氨酯的相对介电常数一般都在6以上,气泡中的场强达到(1.8~3.0) V/ μm 。考虑到电场畸变因素,非真空注胶工艺,特别是要求电容器顶部留有空腔的情况下,其对壳局放很难满足10 pC的要求。局放测试结果表明,端子对壳局放测试时,达不到10 pC的电容器比例很高。也就是说采用非真空注胶工艺,气泡中大概率会发生放电。

对于真空注胶,注胶时的压强为 P_2 ,这也是气泡中的初始压强,出罐后气泡中的压强变为1个大气压,气泡体积变小到 V_1/α 。气泡的击穿场强如图6所示。

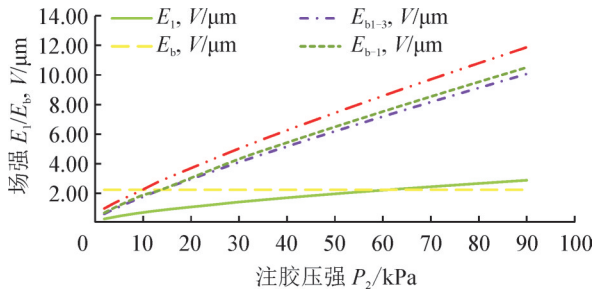


图6 气泡中的场强或击穿场强与注胶压强的关系
Fig. 6 Relationship between the field strength or breakdown field strength in the bubble and the injection pressure

图6中,不同尺寸气隙的击穿场强是按微气隙计算得到的。根据文献^[12, 21],微气隙的击穿电压按式(15)计算,击穿场强可按式(16)计算。

$$U_b = \frac{933.3x}{\ln(6x)} = \frac{933.3P_1 d_2}{\ln(6x)} \quad (15)$$

$$E_{1b} = \frac{U_b}{d_2} = \frac{933.3P_1}{\ln(6x)} \quad (16)$$

式中: U_b 为微气隙的击穿电压,V; E_{1b} 为微气隙的击穿场强,V/ μm ; $x = P_1 d_2$ 为微气隙的pd值,cm·mmHg。其中 $P_1 = 760 \text{ mmHg}$ 或101.3 kPa,为一个大气压强。

式(16)的计算结果如图6所示。图6中, E_1 为气泡中的场强; $E_b = 2.2$ 为空气的放电场强; $E_{1b} - 1.3$ 、 $E_{1b} - 1.0$ 、 $E_{1b} - 0.5$ 分别为根据巴申定律计算得到的气泡关键尺寸为1.3 mm、1.0 mm和0.5 mm的击穿场强。

从图6可以看到:

1)注胶压强(真空度)越大,气泡中的场强越高。当注胶真空度达到60 kPa左右时,气泡中的场强大于空气的击穿场强,气泡产生放电。也就是说注胶压强不应该大于60 kPa,否则可能会诱发局部放电。

2)根据巴申定律^[12]计算,随着注胶真空度提高,微气隙的击穿场强越高;微气隙的尺寸越小,其击穿场强越大。也就是说,尺寸越小的气泡,越不容易产生放电,电容器对壳局放性能越好。真空注胶对于改善电容器对壳局放性能很有意义。

3)真空注胶和非真空注胶,聚氨酯的固化反应速度也会有所不同,这样两者之间就会存在界面,有界面就会有空间电荷积聚,聚集量达到一定程度,会导致电容器对壳局放性能下降,影响其稳定性。

3.2 固化工艺的影响

所谓固化工艺,就是在电容器注胶后,使聚氨酯胶从液体变成固体的温度和时间配合。目前用于直流支撑电容器的聚氨酯固化工艺主要有高温固化、常温固化和混合固化3种。

1)高温固化。高温固化的聚氨酯胶体具有优异的耐热性能,能够在较高温度下保持稳定的物理和化学性能;良好的机械性能,适用于各种结构性粘合领域;储存稳定性优异,保质期较长;适应极端环境,可应对建筑或构件的低温收缩位移;在高温环境下(如80℃以内),胶体不会出现明显软化、流淌或粘结力下降,能抵抗高温导致的材料膨胀位移。

高温固化也存在几个问题:①混胶后粘度大,不利于混胶的渗透和脱气,对电容器局放性能有影响;②混胶后可用时间不够,难以满足电容器生产的要求;③化学反应放热太多,可能会影响元件的性能;④固化后粘接力太强,对电容器的耐候性有不利影响。

2)常温固化。常温固化的优缺点与高温固化的优缺点正好相反,比较适合于电容器应用场合。常温固化最大的问题是固化时间长,特别是冬天。

3)混合固化。混合固化是常温固化工艺的衍生工艺。采用常温固化胶,在注胶后某个时间段给

电容器加温,加快聚氨酯的固化反应。这个工艺存在 2 个问题:①选择加温的时间,这个很重要,需要摸索验证。一般来说,根据化学反应的特点,注胶后的间隔时间越长,效果越差;②加热的温度,温度

越高,固化后的环境适应性就越差,不稳定的可能性越大。

3 种固化工艺对聚氨酯胶体性能的影响详见表 5。

表 5 固化工艺对聚氨酯性能的影响
Table 5 Influence of curing process on properties of PU

固化工艺	耐热性能	机械性能	环境稳定性能	混胶可用时间	混胶粘度	固化时间	局放性能
高温固化	好	好	好	短	大	短	差
常温固化	一般	一般	一般	长	小	长	好
混合固化	较好	差	差	—	—	一般	一般

4 结语

1)聚氨酯胶的介电常数越大,气泡中的电场强度就越大,如果在某个温度点附近介电常数迅速增大,很容易诱发气泡放电,影响电容器对壳局放性能。聚氨酯胶的介电常数应该小一点,更不能存在快速变化现象。

2)聚氨酯的电导率越大,气泡中的电场强度越小。由于空气的电导率远小于聚氨酯的电导率,在直流电场下,聚氨酯中几乎不会产生局放;聚氨酯的电导率出现骤降,其电场强度就会剧增,可能会危害电容器的运行安全。

3)聚氨酯的损耗角正切对直流支撑电容器对壳局放的影响,综合了聚氨酯的介电常数和电导率的影响。如果在某个温度区间内,损耗随温度上升而急剧增大,不仅会导致电容器对壳局放不稳定,还会恶化电容器的运行环境。

4)随着 2 官能团化学反应速度比 α 增大,剩余生胶比例缓慢减小,其中 3 官能度生胶的比例增大不利于电容器对壳局放性能稳定。温度降低,剩余生胶比例降低,聚氨酯耐候性不足,电容器对壳局放可能会出现不稳定现象。

5)由于温度降低,聚氨酯的活性和流动性都不足,固化反应存在不均一性。同时,由于周围的固化剂摩尔数不足,会存在主剂的官能团不完全反应,生胶中存在带电官能团,会导致电容器对壳局放性能不稳定。

6)根据巴申定律计算,注胶真空压力越高,气泡中的场强就越高;注胶真空度提高,微气隙的击穿场强越高;微气隙的尺寸越小,其击穿场强越高。

7)用于直流支撑电容器的双组份聚氨酯胶的固化工艺,目前主要有 3 种:高温固化、常温固化和混合固化,具体工艺应根据设计需要选择。聚氨酯胶的配方不同,固化工艺就不一样,对电容器对壳局放的影响也不一样。

参考文献

[1] 庄远,李宁,孙嘉鹏,等. 生物基聚氨酯材料研究进展[J]. 聚氨酯工业,2022, 37(4):1-4.
ZHUANG Yuan, LI Ning, SUN Jiapeng, et al. Research progress of bio-based polyurethane materials[J]. Polyurethane Industry, 2022, 37(4): 1-4.

[2] 赵鑫. 生物基聚氨酯的研究进展[J]. 广州化工,2016, 44(14):28-29.
ZHAO Xin. Research progress on bio-based polyurethane[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(14): 28-29.

[3] XU Jing, WANG Xiaoyue, ZHANG Xinrui, et al. Room-temperature self-healing supramolecular polyurethanes based on the synergistic strengthening of biomimetic hierarchical hydrogen-bonding interactions and coordination bonds[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451: 138673.

[4] 王鹏,付兰,许双喜,等. 聚氨酯材料在轨道交通方面的应用及研究进展[J]. 聚氨酯工业,2017, 32(1):5-8.
WANG Peng, FU Lan, XU Shuangxi, et al. Application and research of polyurethane materials in rail transit[J]. Polyurethane Industry, 2017, 32(1): 5-8.

[5] 蒋猛. 高安全性聚氨酯材料在煤矿产业的应用[J]. 塑料助剂,2025(2):53-56.
JIANG Meng. Application of high safety polyurethane materials in the coal mining industry[J]. Plastic Additives, 2025(2): 53-56.

[6] 张冰. 聚氨酯在体育防护用品中的应用研究[J]. 粘接, 2019, 40(10):35-37.
ZHANG Bing. Application of polyurethane in sports protective goods[J]. Adhesion, 2019, 40(10): 35-37.

[7] 何汛,杨峰. 聚氨酯在体育行业的应用及研究现状[J]. 现代塑料加工应用,2017, 29(4):60-63.
HE Xun, YANG Feng. Application and research status of polyurethane in sports industry[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2017, 29(4): 60-63.

[8] 李绍雄,刘益军. 聚氨酯树脂及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2002.

[9] 郭永哲. 聚氨酯的合成及其应用发展[D]. 石家庄:河北工业职业技术学院,2014.

- [10]张茅山,左强林,倪琰,等. 直流支撑电容器的热时间常数计算与验证[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026, 47(1): 66-71.
ZHANG Maoshan, ZUO Qianglin, NI Yan, et al. Calculation and verification of thermal time constants of DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(1):66-71.
- [11]DELEBECQ E, PASCAULT J P, BOUTEVIN B, et al. On the versatility of urethane/urea bonds: reversibility, blocked isocyanate, and non-isocyanate polyurethane[J]. Chemical Reviews, 2013, 113(1): 80 - 118.
- [12]陈季丹,刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [13]董全霄,李书明,郑新国,等. 温度对聚氨酯固化材料力学性能的影响[J]. 中国塑料,2018, 32(9):36-41.
DONG Quanyao, LI Shuming, ZHENG Xinguo, et al. Effect of temperature on mechanical properties of polyurethane solidifying system[J]. China Plastics, 2018, 32(9): 36-41.
- [14]郗录朝,王红,许永贤,等. 聚氨酯固化道床的力学性能试验研究[J]. 铁道建筑,2015, 55(1):107-112.
XI Luchao, WANG Hong, XU Yongxian, et al. Experimental study on mechanical performance of polyurethane solidified ballast bed[J]. Railway Engineering, 2015, 55(1): 107-112.
- [15]王运河,杜雷,冯学斌,等. 聚氨酯复合材料固化工艺优化研究[J]. 风能,2023(7):66-70.
- [16]HUANG Y J, CHANG R W, HSIEH Y S. Effects of micron and nano-scale inorganic/organic core-shell particle on the volume shrinkage in the cure of unsaturated polyester and vinyl ester resins[C]//PMSE Preprints: PMSE Symposia Fall 2009, 2009.
- [17]PHILIPP M, ZIMMER B, OSTERMEYER M, et al. Polymerization-induced shrinkage and dynamic thermal expansion behavior during network formation of polyurethanes[J]. Thermochimica Acta, 2019, 677: 144-150.
- [18]ARGIN M, KARADY G G. Characterization of polyurethane foam dielectric strength[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 350-356.
- [19]ANDERSON R A, LAGASSE R R, RUSSICK E M, et al. Effects of void size and gas content on electrical breakdown in lightweight, mechanically compliant, void-filled dielectrics[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(5): 3205-3212.
- [20]JAHODA E, KÚDELČÍK J. Internal partial discharge in cavity of polyurethane[J]. Procedia Engineering, 2017, 192: 365-369.
- [21]雷晓燕,曹刚,肖梁乐,等. 直流支撑电容器电容介损测量方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026,47(1):50-56.
LEI Xiaoyan, CAO Gang, XIAO Liangle, et al. Influence of ambient temperature and applied voltage on the temperature rise and temperature distribution of self-healing power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(1):50-56.
- [22]许然然,杜伯学,肖谧. 高压直流电容器电介质研究现状[J]. 电气制造,2018,13(11):1-10.
- [23]张小舟. 高分子化学[M]. 第5版. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [24]潘祖仁. 高分子化学[M]. 第5版. 北京:化学工业出版社, 2011.
- [25]马慧,刘玉存,柴涛,等. 不同催化剂条件下HTPB/IPDI黏结剂体系的固化过程[J]. 含能材料,2017, 25(5):360-365.
MA Hui, LIU Yucun, CHAI Tao, et al. Study on the curing process of HTPB/IPDI binder system under different catalysts conditions[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(5): 360-365.

作者简介:

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。