

基于热刺激电流的硅橡胶合成绝缘子 老化诊断方法初探

梁英, 丁立健, 李成榕, 杨堃, 屠幼萍

(华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京市昌平区 102206)

Primary Research on the Diagnosis of Aging Silicone Rubber Insulators Using Thermally Stimulation Current

LIANG Ying, DING Li-jian, LI Cheng-rong, YANG Kun, TU You-ping

(Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Diagnosis of aging silicone rubber(SIR) insulator using thermally stimulation current(TSC) technique is investigated. Firstly, based on experimental results of the influence of test conditions on SIR TSC characteristics, proper TSC test parameters have been concluded with corresponding developing trends of trapped charges. Then TSC of two different insulators made from the same manufacturer were measured under given test parameters. It is found that the TSC results of new and old insulators are obviously different. Considering the analysis of hydrophobicity and microstructure, it is indicated that there might be some relationship among the TSC, hydrophobicity and microstructure. It is believed that the TSC technique might be a new method for evaluating and diagnosing the aging SIR insulators.

KEY WORDS: thermally stimulation current; silicone rubber; composite insulator; aging; diagnosis; trapped charge

摘要: 初步研究了用热刺激电流(TSC)技术进行硅橡胶合成绝缘子老化状态评估诊断的可行性。首先研究各种试验参数对硅橡胶合成绝缘子 TSC 特性的影响, 结合不同测试条件的硅橡胶绝缘子陷阱电荷趋势图, 确定一种合适的 TSC 试验参数, 并在此给定的试验参数下, 对比研究同一厂家新旧 2 批合成绝缘子的 TSC 特性。初步试验发现, 新旧绝缘子的 TSC 测试结果明显不同。结合绝缘子的憎水性测试及微观结构分析发现, TSC 测试结果与憎水性、微观结构之间存在一定联系。研究结果表明, 如果深入系统地研究 TSC 特性与老化特性之间的关系, TSC 技术有可能成为硅橡胶合成绝缘子老化程度评价及诊断的新方法。

关键词: 热刺激电流; 硅橡胶; 合成绝缘子; 老化诊断; 陷阱电荷

0 引言

硅橡胶合成绝缘子以其显而易见的优越性在电力系统中得到了广泛应用。由于其外绝缘材质为有机材料, 长年带电运行在户外的恶劣条件下, 硅橡胶合成绝缘子的耐老化性一直是研究人员普遍关注的问题, 尤其是老化程度的诊断及评价方法引起了现场及有关人员的高度重视^[1-5]。目前, 合成绝缘子老化诊断的方法主要靠肉眼观察及老化前后物理、化学结构的分析对比。评价因子主要包括颜色、硬度、憎水性以及泄漏电流、表面电阻和介电常数等宏观电性能^[2-5]。这些因子大多数对老化过程不够敏感, 不利于及时发现有潜在危险的劣化绝缘子。因此, 迫切需要探寻一种行之有效的评价及诊断硅橡胶合成绝缘子老化的新方法。

众所周知, 硅橡胶的老化可能会引起分子链的断裂, 产生大量的自由基, 继而发生交联、氧化等化学反应, 从而导致材料内陷阱密度的增加和能级的加深^[6]。研究表明, 陷阱密度的增加可以作为判定聚合物电老化程度的一个有效参数^[7-8]。考虑到热刺激电流(TSC)技术在材料微观特性研究中的广泛应用^[9-10], 借助TSC技术, 可以把材料的微观电特性与宏观性能结合起来, 有望为判定硅橡胶合成绝缘子的老化开辟一个新的视角。

到目前为止, 尚未见硅橡胶TSC特性的相关报道。根据TSC试验方法^[11], 试验过程中需要确定的参数包括极化电压、极化温度、极化时间和温度范

基金项目: 国家自然科学基金项目(50577020)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50577020).

围等。因此,本文首先研究了不同试验参数对硅橡胶TSC特性的影响,以确定合适的TSC试验参数。然后在此试验参数下,对新旧绝缘子试样进行了TSC对比试验,结合相应的憎水性测试、扫描电镜(SEM)分析,对TSC在硅橡胶合成绝缘子老化诊断中的应用进行了初步探讨。

1 TSC 试验参数的确定

1.1 试品制备

从绝缘子伞裙上切取厚 1mm、直径 15mm 的切片,将之置于无水乙醇中充分漂洗,漂洗后的试品置于烘箱中,在 50℃ 下干燥 2h,真空蒸镀厚 50nm、直径 10mm 的金膜,作为试验用电极,以改善电极与绝缘材料的接触性能。

1.2 TSC 试验系统

TSC方法是在介质物理基础上发展起来的一门技术。从材料的TSC曲线中可以得到表征材料微观特性的陷阱密度、陷阱能级等微观参数^[12]。

所研制的TSC试验系统见图 1,主要由直流加压、控温、电流测量及电流和温度实时记录 4 部分组成。采用脉宽调制型直流高压发生器对试品加压;通过电热丝及智能温控仪实现对温度的控制;静电计则用来测量外电路的微电流;以Labview为软件平台开发的系统实时记录TSC电流和温度。这里需要指出的是,整个试验是在 10^{-4} Pa 的真空环境下进行的,目的是为了防止测试较厚试样时出现表面闪络,同时还能避免冷却过程中表面结冰。

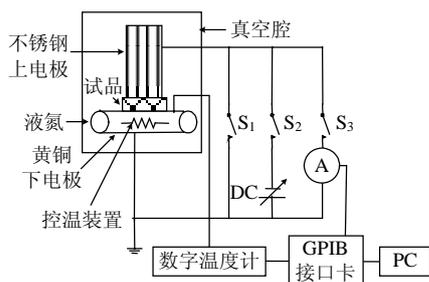


图 1 TSC 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TSC measurement

对照图 1, TSC 试验步骤简述如下:首先,在室温下断开 S_2 、 S_3 , 闭合 S_1 , 将试品两端短路,继而升温到 T_1 ℃ (极化温度),并保持此温度;然后,断开 S_1 , 闭合 S_2 , 试品两端加压 U kV (极化电压),持续 t min (极化时间);之后,注入液氮迅速冷却试品到 $T_2 = -50$ ℃,并保持 2min,断开 S_2 , 闭合 S_1 ;最后,断开 S_1 , 闭合 S_3 , 以 1 ℃/min 升高温度直到 80 ℃,同时将静电计接入电路记录电流随温度变化的情

况。考虑到硅橡胶材质耐受温度的限制^[1],本试验选取的温度范围为 -50 ℃~ 80 ℃。

1.3 TSC 试验结果

(1) 不同极化电压。

本轮试验保持 $T_1 = 57$ ℃, $t = 20$ min, U 分别为 4、6、8.3、10、14kV, 所得 TSC 对比曲线如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 8.3、10kV 所对应的 TSC 曲线无论在高温区还是低温区形状都很近似; 另外 3 条曲线, 即 4、6、14kV 电压所对应的 TSC 曲线在低温区 (-35 ℃ 附近) 的峰值幅度有所降低, 而高温区 (34 ℃ 附近) 的峰值情况变化不大。

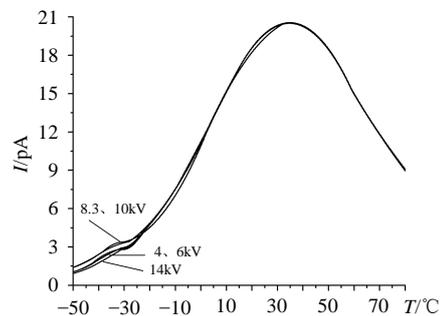


图 2 不同极化电压下的 TSC

Fig. 2 TSC curves under varied polarizing voltages

(2) 不同极化温度。

本轮试验中 $U = 8.3$ kV, $t = 20$ min, T_1 分别为 30、40、47、57、70℃, 得到的 TSC 对比曲线见图 3。

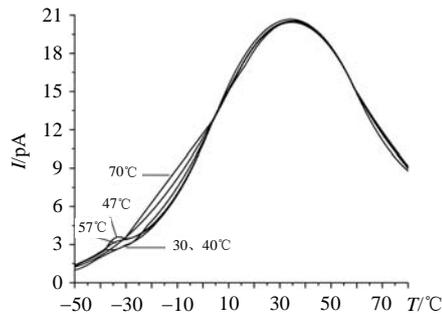


图 3 不同极化温度下的 TSC

Fig. 3 TSC curves under varied polarizing temperatures

图 3 显示, 温度低于 47 ℃ 时, 随着温度的降低, 低温区的峰值减小; 温度达到 70 ℃ 时, 低温区的峰值消失, 而 57 ℃ 对应的低温区的峰值低于 47 ℃ 的值。

(3) 不同极化时间。

此轮试验保持 $U = 8.3$ kV, $T_1 = 57$ ℃, t 分别为 5、10、20、30、40 min, 所得 TSC 对比曲线见图 4。

从图 4 可以看出, 加压时间为 10min 和 20min 的 TSC 曲线近似, 30min 与 40min 的曲线相似; 加压时间为 5min 时的 TSC 曲线的高温区峰值最小,

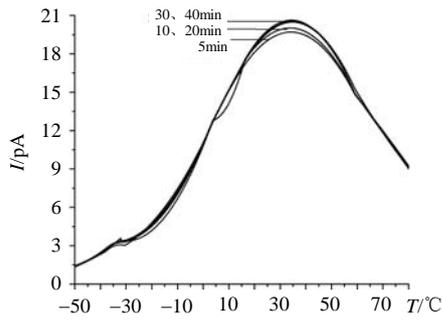


图 4 不同极化时间下的 TSC
Fig. 4 TSC curves under varied polarizing times

30min 与 40min 的峰值最大。

图 5 为不同试验参数下的陷阱电荷量对比结果。其中陷阱电荷量的计算依据如下方法：

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} I(t)dt = \frac{1}{\beta} \int_{T_0}^{T_1} I(T)dT = \frac{60}{1.0} \times \int_{T_0}^{T_1} I(T)dT$$

式中 β 为升温速率。因温度和时间近似成正比，因此电流对温度的积分乘以一个比例系数(升温速率 $1^\circ\text{C}/60\text{s}$ 的倒数)，就得到陷阱释放出的电荷量。可

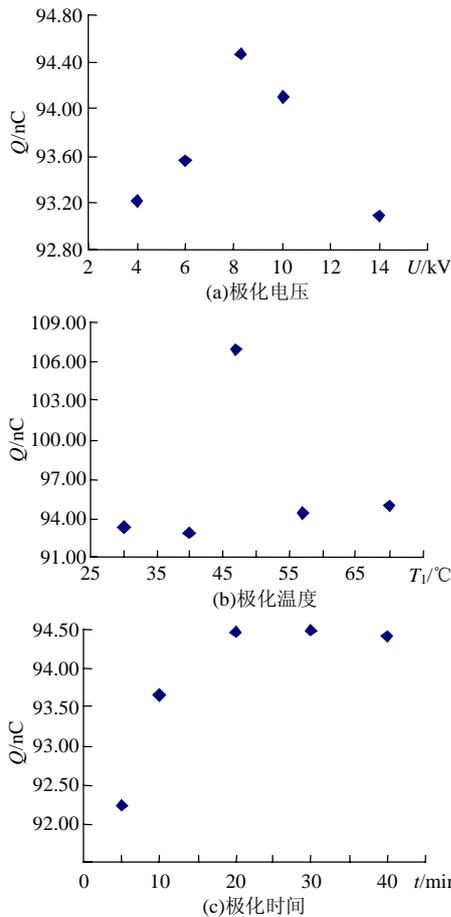


图 5 不同极化条件下的陷阱电荷量
Fig. 5 Trapped charges under varied polarizing conditions

见，陷阱电荷量随着极化电压、极化温度的变化近似呈现出倒“V”字，而随着极化时间的增加呈现出饱和趋势。

1.4 参数确定

聚合物中的局域态密度非常高，即存在着大量陷阱，注入的电子或空穴的入陷过程是一个几率问题^[13]。若有大量浅陷阱存在，那么注入的电荷在浅陷阱中入陷的几率大，反之，入陷于较深陷阱的电荷就多。根据本文试验结果，可以发现试品中包含大量的深能级缺陷，故注入的电荷落入深陷阱的几率较大。

当电压较低时，介质中的空间电荷以杂质电离得到的可动离子为主，电极注入的电荷为辅；当电压升高到一定值时，电极的注入占据了主要地位；之后随着电压的继续升高，电极注入更加明显，而积聚在电极附近的可动离子容易与电极上的电荷发生交换，从而使离子中性化。具体到本试验结果中，通过测量不同极化电压下表面电位，发现当外加电压为 10 kV 时其电位与电极电位方向相同，据此认为此时已经发生了较明显的电荷注入。尽管不同电压下的电极注入表现不同，但注入的电荷入陷深陷阱的概率较大，故所得 TSC 曲线在高温区的区别不是太大。在低温区，极化电压为 4、6kV 时，由于杂质离子未充分电离或注入电荷不够充分，得到的 TSC 曲线峰值较 8.3kV 电压的低；极化电压达到 14kV 时，可能是由于存在于其中的填料的热离子发生了电中性化使得 TSC 曲线峰值幅值有所降低。故最佳极化电压范围确定为 8.3~10 kV。

极化温度偏低会使中性化的离子即粒子很难返回到介质内重新解离化，故可动离子数量减少，故引起 TSC 曲线中低温区电流幅值的降低；极化温度偏高时相当于注入温度的热能大于对应的陷阱能级(尤其是对于浅陷阱)，而使注入的载流子在高温注入时立即被激发掉而不能被捕捉，考虑到这个因素，本试验中 70°C 时的曲线低温区的峰值消失也是有一定道理的。本试验结果表明极化温度确定为 47~57°C 是较为合适的。

当发生电荷注入时，随着极化时间的增加，注入的电荷量逐渐增加，但一旦出现过剩空间电荷时，即会影响后续电荷的注入，此时的电荷值达到饱和。在本试验中，所加极化电压下已有较明显的电荷注入，当加压时间为 5min 时，由于注入的电荷未能填满深陷阱，故所得 TSC 曲线高温区的峰值较低；而达到 20min 以上时可以认为电荷注入达到

饱和。故选取 20min 的极化时间是足够的。

结合计算所得陷阱电荷量,初步确定后续 TSC 试验参数为:极化电压 $U=8.3\text{kV}$,极化温度 $T=47^\circ\text{C}$,极化时间 $t=20\text{min}$ 。

2 实例说明

2.1 新旧绝缘子的 TSC 测试结果

在上述确定的试验外加条件下,对同一厂家的新旧试品进行了 TSC 对比试验。试验所用绝缘子型号为祥和产 FBX4 220/110,其中旧绝缘子已投运 15 年,是从河南平顶山市平徐线 79#杆塔上摘取的(79#塔距许南公路约 100m,污秽等级为 III 级)。按照 1.1 中方法制备试品,新旧试品分别标记为试品 A、B。

所得 TSC 对比结果如图 6 所示,可以看出,试品 A、B 的 TSC 曲线形状大致相同,但试品 B 的电流峰的幅值为 20.55pA ,高于试品 A(电流峰值为 15.41pA);且试品 B 电流峰对应的温度也向高温区偏移。表 1 是试品 A、B 的 TSC 特征值及从各自 TSC 曲线中计算而得的一些相关信息。可见,试品 B 具有较深的陷阱能级和较多的陷阱电荷量。上述结果说明旧绝缘子在现场运行若干时间后内部出现了更多的缺陷。

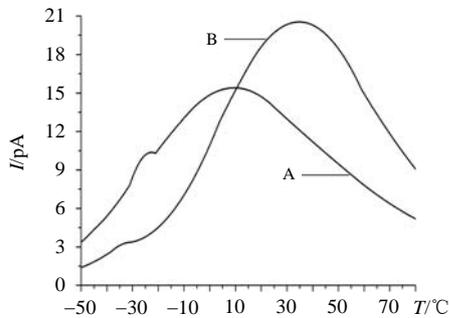


图 6 试品 A、B 的 TSC

Fig. 6 TSC curves of sample A and B

表 1 试品 A、B 的 TSC 特征值及陷阱参数

Tab. 1 TSC peaks and trap parameters of sample A and B

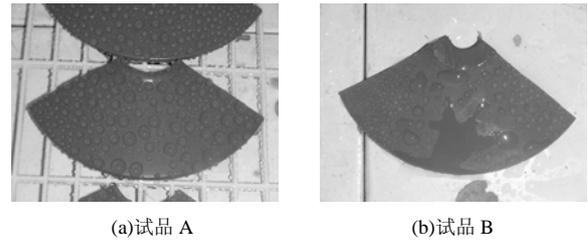
参数	试品 A	试品 B
电流峰值/pA	15.41	20.55
电流峰对应的温度/°C	9.32	34.70
陷阱电荷/nC	84.67	94.47
陷阱能级/eV	约 0.18	约 0.56

试验中新旧试样各取 3 片,每片作 3 次重复性试验,发现试验结果具有很好的重复性。文中所给试验结果是从中选取的典型结果。

2.2 憎水性测试结果

憎水性是表征材料老化与否的一个重要参数^[14]。为了研究 TSC 特性与表征合成绝缘子老化常

规方法之间的关系,对新旧试品的憎水性进行了测试。图 7 为试品 A、B 的憎水性测试图。可见,新绝缘子上为细小的水珠,形状大多为规则圆球,且分布均匀;而旧绝缘子上散落着大片的水膜,基本上为不规则的椭圆形水球,且水渍清晰。利用憎水性分析软件测得试品 A、B 的憎水等级分别为 HC1、HC4 级。显然,旧试品的憎水性较差。结合各自的陷阱参数,不难发现,陷阱能级浅、陷阱电荷量少的新试品具有较好的憎水性能。



(a)试品 A

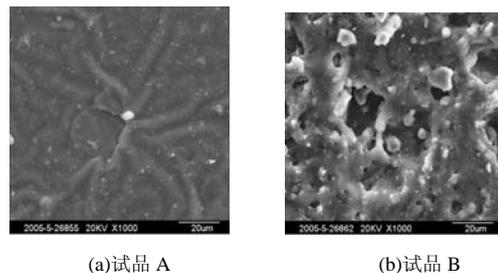
(b)试品 B

图 7 试品 A、B 的憎水性照片

Fig. 7 Hydrophobicity pictures of sample A and B

3 讨论

TSC 技术用于测量某些材料的微观参数(陷阱能级、陷阱密度等),反映的是材料内部的陷阱分布。材料中的陷阱是由于内部的结构缺陷(包括物理缺陷和化学缺陷)引起的,故材料的微观结构直接影响其陷阱分布。从理论上讲,材料越不均匀,位于其禁带中的局域能级密度越大(出现高局域能级的几率越大),表现在 TSC 结果中,即为 TSC 曲线所包围的面积越大或电流峰所对应的温度越高。合成绝缘子在运行过程中,由于受到表面放电、紫外照射等的影响,其表面材质会发生降解、氧化等化学反应,引起分子长链断裂,产生大量的新的化学基团,同时也可能破坏其表面结构的完整性,形成微孔、裂纹甚至裂缝等缺陷,从而导致材料内部陷阱密度的增加或陷阱能级的加深。为了观察试品微观结构的变化,委托清华大学对试品 A、B 进行了 SEM 微观结构分析。结果如图 8 所示,放大倍数为 1000。可以看出,运行 15 年后的试品 B 表面存在



(a)试品 A

(b)试品 B

图 8 试品 A、B 的 SEM 形貌图

Fig. 8 SEM morphologies of sample A and B

较大大小、深浅不一的微孔缺陷，故其捕获载流子的能力较强，结果引起 TSC 曲线中陷阱电荷量的增加和陷阱能级的加深。表 1 的结果证实了这一点。

憎水性是反映固体材料表面性能的参数之一，主要取决于表面能的高低，其中材料的微观结构是影响表面能的决定性因素。在合成绝缘子用硅橡胶中，螺旋状卷曲的分子结构使得主链中的硅氧键极性相互抵消，整体上呈弱极性，分子间作用力弱使得硅橡胶内聚能密度低，从而硅橡胶的表面能也很低。又由于侧链上的甲基屏蔽了主链中的氧原子，使得水分子难以与亲水的氧原子接近，从而憎水性能好；而对于长年运行在户外恶劣条件下的硅橡胶合成绝缘子，由于受各种外界因素的影响，其硅氧烷的侧链易被打断，并产生硅醇基团，表面能升高，材料表面憎水能力可能会随之下降^[14-15]。一般来说，同种材料，如果内部结构越均匀、完整，缺陷越少，其相应的憎水性等级相应也高。这一点可以从图 8 中看出，新绝缘子试品 A 表面呈波纹状，结构完整，缺陷较少，故其憎水图片(图 7)呈现均匀分布的规则水珠，憎水等级较高。

对比图 6~8 新旧绝缘子试品的 TSC 特性、憎水性以及相应的 SEM 微观结构，结合以上分析的微观结构与 TSC 特性、憎水性之间的联系，很容易发现合成绝缘子的 TSC 特性和憎水性之间存在着一定的对应关系，这种关系通过合成绝缘子的微观结构联系起来。因此，采用 TSC 特性来反映合成绝缘子的憎水性是有可能的，由于憎水性是表征材料老化与否的一个重要参数，结合本文的试验结果，验证了 TSC 技术用于硅橡胶老化诊断的可行性，同时从一个侧面证明了文中给定 TSC 试验参数的合理性。

4 结论

(1) 试验参数的不同会引起硅橡胶 TSC 特性的变化。极化电压和极化温度的影响主要体现在低温区的 TSC 特性上，高温区的电流峰值基本不变，陷阱电荷量随之呈现出倒“V”字；极化时间主要影响高温区的电流峰值，而陷阱电荷随之呈现出饱和趋势。

(2) 老化前后绝缘子的 TSC 特性与相应的憎水性、SEM 之间存在一定联系。老化的绝缘子缺陷较多，陷阱能级深、陷阱电荷量大，且对应的憎水性显著下降。

(3) 从一个侧面证明了文中所选参数的合理

性，并给出了试验参数的参考范围：极化电压为 8.3~10 kV，极化温度在 47~57℃ 之间，极化时间不少于 20min。

(4) TSC 技术能够成为评价硅橡胶老化程度的一种有效手段。

参考文献

- [1] 张福林, 张福祥. 硅橡胶合成绝缘子外绝缘抗老化性能综述[J]. 中国电力, 1996, 29(6): 42-45.
Zhang Fulin, Zhang Fuxiang. A summary of silicone rubber synthetic insulator external insulation anti-aging effect[J]. Electric Power, 1996, 29(6): 42-45(in Chinese).
- [2] 吴经锋, 袁检, 张建荣, 等. 复合绝缘子老化评估方法浅析[J]. 高压电器 2003, 39(2): 32-38.
Wu Jingfeng, Yuan Jian, Zhang Jian rong, et al. Analysis on the evaluation method of aging for composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(2): 32-38(in Chinese).
- [3] Spellman C A, Young H M, Haddad A, et al. Survey of polymeric insulator ageing factors[C]. High Voltage Engineering Symposium, London, UK, 1999, 4: 160-163.
- [4] J Reynders P, Jandrell I R, Reynders S M. Surface ageing mechanisms and their relationship to service performance of silicone rubber insulation[C]. High Voltage Engineering Symposium, London, UK, 1999, 4: 54-58.
- [5] Vlastos A E, Gubanski S M. Surface structural changes of naturally aged silicone and EPDM composite insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(2): 888-900.
- [6] 蓝磊. 室温硫化硅橡胶纳米复合防污绝缘特性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
Lan Lei. RTV nanocomposite used in anti-pollution insulation [D]. Wu Han: Wu Han University, 2004(in Chinese).
- [7] 尹毅, 屠德民, 李明, 等. 用等温电流法研究自由基清除剂的作用机理-聚合物电老化陷阱理论的实验验证[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 13-15.
Yin Yi, Tu Demin, Li Ming, et al. Study on the action mechanism of the free radical scavenger with isothermal-current decay method [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 13-15(in Chinese).
- [8] 王新生, 屠德民, 杨会中. 聚合物电老化击穿临界状态的实验验证[J]. 中国电机工程学报, 1993, 21(增刊): 1-6.
Wang Xinsheng, Tu Demin, Yang Huizhong. The experimental verification of breakdown critical state during electrical aging in polymer[J]. Proceeding of the CSEE, 1993, 21(sup): 1-6(in Chinese).
- [9] Van Turhour J. Thermally stimulated discharge of polymer electrics [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
- [10] 尹毅, 肖登明, 屠德民, 等. TSC/TSL 联合谱在绝缘聚合物电老化研究中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 1-5.
Yin Yi, Xiao Dengming, Tu Demin, et al. Application of TSC/TSL united spectra in investigation of electrical aging in insulating polymer[J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 22(3): 1-5(in Chinese).
- [11] Chen R, Kirsh Y. Analysis of thermally stimulated processes [M]. Oxford: Pergamen Press, 1981.

- [12] 王立衡. 介质的热刺激电流理论及其应[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [13] 尹毅. 聚乙烯电老化中空间电荷和陷阱参数的变化规律[D]. 西安: 西安交通大学, 2000.
Yin Yi. The variation of space charge and trap parameters in polyethylene during the electrical aging process[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2000(in Chinese).
- [14] Hillborg H, Gedde U W. Hydrophobicity changes in silicone rubbers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 703-717.
- [15] Kumagai S, Yoshimura N. Hydrophobic transfer of RTV silicone rubber aged in single and multiple environmental stresses and the behavior of LMW silicone fluid[J]. IEEE Transactions on Power

Delivery, 2003, 18(2): 506-516.

收稿日期: 2007-01-17.

作者简介:

梁英(1978—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术, lyxj527@126.com;

丁立健(1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电介质材料介电特性、放电理论及应用、电气设备绝缘在线监测;

李成榕(1957—), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为气体放电及脉冲功率技术、电气设备绝缘在线监测与故障诊断、电介质材料介电特性。

(编辑 车德竞)

缅怀赵良炳教授

清华大学电机系教授、电力电子工程研究中心副主任、《中国电机工程学报》编委赵良炳先生因病医治无效, 于2007年7月2日凌晨不幸逝世, 享年69岁。

赵良炳教授从事现代电力电子技术教学和科学研究工作四十余年, 桃李满天下, 多部著作成为高校师生和电力电子行业的重要参考书。在电力电子元件和装置研究方面均做出了重要贡献, 是国内电力电子学科和行业领域中具有广泛影响的知名专家。赵良炳教授热爱祖国, 忠于党的科教兴国战略, 数十年如一日, 始终勤勤恳恳、始终不离教学和科研第一线、心系国家电力电子行业的发展。赵良炳教授在清华大学电机系承担国家电网公司重大攻关项目—— $\pm 20\text{Mvar}$ 先进动态无功补偿项目中, 对项目立项、主电路方案选择、 $\pm 300\text{kvar}$ -动态无功补偿器样机的研制以及其它多项关键技术的解决都发挥了不可替代的作用。

作为论文作者和资深审稿专家, 赵良炳教授为《中国电机工程学报》的发展做出了重要贡献。

深深地缅怀赵良炳教授!

《中国电机工程学报》编辑部

二零零七年七月二十五日