

# 纳米蒙脱土对聚乙烯击穿和电导特性的影响

张晓虹, 高俊国, 郭宁, 张金梅, 刘亚丽, 胡海涛  
(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 为了探讨纳米蒙脱土对聚乙烯击穿性能和电导特性的影响, 采用威布尔(Weibull)统计的方法分析了电介质的击穿场强, 利用电导温度谱图分析了不同试样电导的温度特性, 用扫描电镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)对复合材料的微结构进行了表征。研究了插层温度和电老化对聚乙烯复合材料击穿性能的影响及其电导的温度特性, 以及电介质电击穿后结构的变化。结果表明, 用蒙脱土对聚乙烯进行改性能明显提高其击穿性能和改善电导特性: 与纯聚乙烯相比, 聚乙烯/蒙脱土复合材料试样具有明显的极性电介质的损耗特征, 而且复合材料试样的绝缘电阻率在 50~60 °C 的温度范围内明显高于低密度聚乙烯(LDPE)的值; 而耐电老化性能也有所提高: 在电老化 66 h 后, 其击穿场强是纯聚乙烯的 1.10 倍; 并且蒙脱土与聚乙烯形成的强的相互作用区像“交联点”等, 能明显减少复合材料的电场破坏。可见, 纳米蒙脱土的加入有望提高聚乙烯的长期介电强度和耐温等级。

**关键词:** 聚乙烯; 纳米复合材料; 击穿场强; 威布尔分布; 电气强度; 电导

**中图分类号:** TM215.92; TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6520(2009)01-0129-06

## Influences of Nano-montmorillonite on Breakdown and Electrical Conductivity of Polyethylene

ZHANG Xiao-hong, GAO Jun-guo, GUO Ning, ZHANG Jin-mei, LIU Ya-li, HU Hai-tao  
(College of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)



**Abstract:** To investigate the dielectric properties of polymer layered silicate (PLS) nanocomposites, which exhibit excellent thermal and mechanical properties, we prepared the polyethylene/montmorillonite nano-composites by the melting intercalation process, analyzed the electrical breakdown strength by the Weibull statistical analysis, and determined the morphology of the nano-composites by means of scanning electronic microscope (SEM) and atomic force microscope (AFM). Moreover, we focused on the characteristics of electrical breakdown and electrical conductivity of the nano-composites. The test results indicate that electrical breakdown strength and insulation resistance of LDPE/O-MMT is obviously higher than that of LDPE, after 66 hours electrical aging, electrical breakdown strength of LDPE/O-MMT/C is 1.10 times that of LDPE. "interaction zones" may form in LDPE and MMT such as crosslinking points and it can reduce the electric field damage of nanocomposites. It can be confirmed that polyethylene improved by nano-montmorillonite is provided with much higher dielectric strength and better heat resistance property than those of pure PE.

**Key words:** polyethylene; nanocomposites; breakdown strength; Weibull distribution; electric strength; electrical conductivity

## 0 引言

聚合物以其优越的电气和机械性能而被广泛用于电气绝缘领域, 但是在使用过程中, 电老化现象困扰着电气工程人员。实验已证明, 虽然绝缘聚合物的工作电场强度只有击穿电场强度的 1/10, 但是长时期工作后绝缘中会产生树枝化, 最后导致绝缘击穿<sup>[1]</sup>。为了能够延长聚合物绝缘的使用寿命和提高电力设备运行的可靠性, 国内外学者做了大量的研究工作, 并提出了许多理论。主要的研究工作都集

中在往聚烯烃基体中添加某种添加剂, 来减少聚合物体内陷阱深度, 或改变结晶形态, 减少缺陷, 或增加电导, 减少电场集中<sup>[2-4]</sup>。

聚乙烯(PE)是一种在电气绝缘领域应用极为广泛的塑料, 我国在电缆制造特别是聚乙烯绝缘材料方面需求很大且要求很高, 对固体绝缘电缆的绝缘材料聚乙烯进行深入研究具有重要的工程意义<sup>[5]</sup>。目前一般采用传统方法来对聚乙烯绝缘料进行改性。常用的方法有添加剂、共混、接枝、二元共聚 4 种, 其中共混技术是提高聚乙烯介电性能使用最多的一种方法, 但是不同组分的共混会形成两相结构的微观界面, 甚至出现向材料表面渗透和分离的现象, 影响共混物的其它介电性能, 如共混可能会导致介电强度降低。因此, 最好的方法是使用两种

基金资助项目: 国家自然科学基金(50377009; 50677010)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50377009; 50677010)。

化学结构相似、相容性好的组分来进行共混,从而消除两种材料的微观界面的不良影响。本文成功地制备了聚乙烯/蒙脱土纳米复合材料。利用扫描电镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)对低密度聚乙烯/蒙脱土(LDPE/O-MMT)纳米复合材料进行了微结构表征,并分析确定了蒙脱土纳米复合材料的结构形态。试验研究了未加相容剂的纳米复合材料LDPE/O-MMT和加入相容剂的纳米复合材料LDPE/O-MMT/C的击穿强度和电导。

## 1 试验部分

### 1.1 试样的制备

本文使用两种蒙脱土:自制有机化钠基蒙脱土,粒径尺寸为40~70 nm,其片层结构间所置换出的阳离子的质量摩尔浓度为0.9~1.2 mol/kg。在与低密度聚乙烯(LDPE)复合之前,用十六烷基铵盐插层剂对蒙脱土进行预插层和有机化处理。经过十六烷基铵盐有机化的工业品蒙脱土,径/厚比为200。LDPE熔融指数MI为1.5。

将聚乙烯、工业品有机化蒙脱土、相容剂(可改善有机相和聚合物基体之间的相容性)、配合剂等按不同比例,在转矩流变仪上进行共混,螺杆转速为40 r/min,混炼温度分别为413、423、433、453 K;将聚乙烯、自制有机化蒙脱土、相容剂(可改善有机相和聚合物基体之间的相容性)、配合剂等按不同比例,在转矩流变仪上进行共混,螺杆转速和混炼温度分别为40 r/min和423 K。出料后,在平板硫化机上热压成型,制得所需要的试样。下文各图中试样编号与主要成分如表1所示。

表1 不同复合材料试样的主要成分

Tab. 1 Main components of different composites

试样编号	主要组成成分		
#1(LDPE)	PE	—	—
#2(LDPE/O-MMT)	PE	有机化土	—
#3(LDPE/O-MMT/C)	PE	有机化土	相容剂

### 1.2 纳米复合材料微结构的表征

利用扫描电镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)分别对不同纳米复合材料的相态分布、微结构等进行分析。试样厚度约100 μm。在进行SEM试验之前,在样品表面镀上了一层碳膜。

### 1.3 纳米复合材料击穿的研究

击穿实验在室温下进行,升压速率为0.5 kV/s,样品及电极浸泡在变压器油中。击穿电极直径为25 mm,试样厚度为(100 ± 10) μm。

威布尔(Weibull)分布在1939年由瑞典物理学家威布尔提出并将其应用于疲劳试验中。它反映了材料在一定的电场强度 $E$ 下被击穿的概率或在一定的时间 $t$ 内失效的概率。Weibull分布被广泛用来评价绝缘材料在交流电场下击穿行为的统计规律<sup>[6-10]</sup>。二参数Weibull分布的表达式为

$$P(E) = 1 - \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) \quad (1)$$

式中, $P(E)$ 为累积失效概率; $E$ 为实验破坏场强;为表征数据分散程度的形状因子; $E_0$ 为 $P=63.2\%$ 时的击穿场强,即Weibull击穿场强,用来比较不同试样击穿性能。式(1)的对数形式线性回归方程为

$$\lg(-\ln(1-P)) = (\lg E - \lg E_0) \quad (2)$$

由式(2)可以计算得到 $E_0$ 。

对每一个确定的 $E$ 值, $P$ 值可由式(3)来计算

$$P = \frac{i - 0.5}{n + 0.25} \quad (3)$$

式中, $i$ 表示 $E$ 值升序排列的测量次数(即样品数); $n$ 为每种样品总的测试次数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SEM微结构分析

图1分别示出了未加相容剂的LDPE/O-MMT和加入相容剂的LDPE/O-MMT/C试样的SEM图像。蒙脱土质量分数均为3%。图中浅色的区域代表分散在LDPE中的无机相蒙脱土,而深色的区域则表示有机连续相的LDPE基体。

从图1(a)的SEM图像可以看到:在未加相容剂的纳米复合材料LDPE/O-MMT中,有机化蒙脱土粒子聚集在一起形成了尺度为100~800 nm的较大粒子,而且深、浅色区域分明,这说明聚乙烯分子几乎未能插入到蒙脱土的片层之间。

然而,从图1(b)的SEM图像可以看到:在加入相容剂的纳米复合材料LDPE/O-MMT/C中,不仅无机相的尺度明显减小,而且在浅色分散相的中间出现了深色的区域。这表明聚乙烯基体已经很好地插入到蒙脱土片层间,形成了剥离型的nm级片层。

### 2.2 AFM微结构分析

为了进一步证明复合材料中nm级的剥离和层状结构的存在,本文又利用AFM对纳米复合材料进行了微结构分析。图2中为加入相容剂的纳米复合材料LDPE/O-MMT/C的二维AFM相图。从图2中可以看到大部分硅酸盐都被剥离成间距为20~100 nm的nm级片层。

通过对SEM和AFM的试验结果分析,可以认为:由于蒙脱土片层间的阳离子易被有机阳离子置

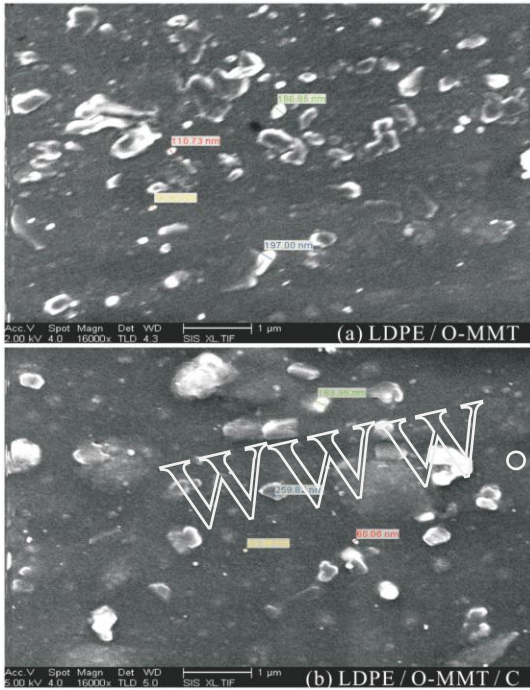


图 1 不同纳米复合材料试样的 SEM 照片  
Fig. 1 SEM photographs of various samples

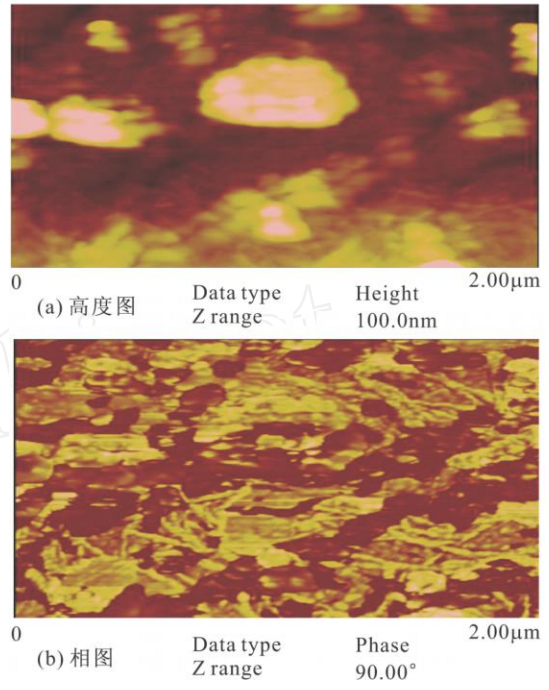


图 2 LDPE/O-MMT/C 的 AFM 照片  
Fig. 2 AFM photographs of LDPE/O-MMT/C

换,所以在一定条件下用烷基铵盐与蒙脱土原土在水溶液中进行反应,烷基将蒙脱土中的阳离子置换出来,并扩大了蒙脱土片层间的距离,为有机聚合物的插层创造了条件。同时烷基还与高分子化合物有较强的分子链结合力。在相容剂的作用下,LDPE 以熔融插层的方式成功地进入了蒙脱土片层之间,聚乙烯在蒙脱土片层中的插入导致其层状有序结构被破坏,被剥离的片层不规则地分散在聚乙烯基体中,形成剥离型纳米复合材料<sup>[11,12]</sup>。而未加相容剂的复合材料可能形成 μm ~ nm 级复合结构。

2.3 加工工艺对击穿场强的影响

分别对混炼温度为 413、423、433、453 K 的复合材料进行了工频击穿实验,并利用 Weibull 分布来分析击穿数据。结果如图 3 和表 2 所示。

由表 2 交流击穿场强的 Weibull 参数可以看出:Weibull 击穿场强  $E_0$  和形状参数 随着混炼温度的提高而先增大后减小,在 423 K 时出现最大值,说明在该温度下聚乙烯能很好地插入蒙脱土片层间,形成较均一的纳米复合材料,使击穿场强提高。另外温度的影响可从热力学的角度给与详细讨论。

从热力学的角度考虑插层过程,将蒙脱土与聚乙烯混合后,聚乙烯分子插入到蒙脱土晶体片层中能否顺利进行,取决于插层过程发生前后混合材料自由能的变化( $G$ ),即当  $G < 0$  时,插层过程可以自发进行。因插层多是在恒温条件下进行的,所以若要使插层反应自发进行,须有下式成立

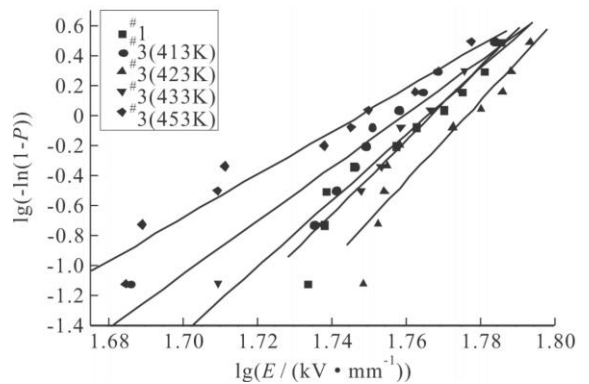


图 3 不同试样击穿场强的 Weibull 分布曲线  
Fig. 3 Weibull distribution curve of different breakdown strengths of samples

表 2 不同试样交流击穿场强的 Weibull 参数  
Tab.2 Weibull parameters of different DC breakdown strengths of samples

试样 (混炼温度)	Weibull 参数	
	Weibull 击穿场强 $E_0$ / (MV · mm <sup>-1</sup> )	形状参数
# 1	54.70	15.64
# 3(413 K)	57.54	17.65
# 3(423 K)	59.84	26.32
# 3(433 K)	58.48	21.74
# 3(453 K)	55.98	14.2

$$G = H - T S < 0.$$



式中,  $H$  和  $S$  分别为材料的焓变和熵;  $T$  为温度。当  $G < 0$  成立时, 即要求有  $H < T S$ 。

在熔融插层过程中, 因材料粘度远远大于溶液插层过程中混合材料的粘度, 聚合物分子链被束缚在硅酸盐片层中, 构象变化受到限制, 不能得到充分满足, 故为熵减过程,  $S < 0$ 。若要使  $H < T S$  成立, 则须有  $|H| > |T S|$  成立。此时,  $H$  是决定插层能否实现的关键因素。由于该过程体积保持不变, 所以  $|H|$  在数值上等于内能, 即关键是聚合物与粘土片层之间的相互作用程度。另外,  $H < 0$  说明聚合物熔体插层过程为放热过程, 即低温有利于插层或原位聚合的进行。然而有研究表明, 聚乙烯与蒙脱土的混合温度越高, 插层越容易实现<sup>[13]</sup>。

对于前述实践与理论之间的矛盾可以理解为: 在接近熔融温度时聚乙烯粘度较大, 聚乙烯大分子链缠绕严重, 分子链的运动能力较弱。较低的运动能力抑制了插层反应进程的发生。将插层复合温度适当提高, 可以提高聚乙烯分子的运动能力, 因此聚乙烯分子较容易进入到层状硅酸盐片层中, 因而有利于插层反应的发生。当插层温度过高时, 聚乙烯分子链段运动剧烈, 使得分子进入层状硅酸盐片层间的几率反而降低; 温度再进一步提高则可能造成聚乙烯大分子的降解。

### 2.4 电老化对击穿场强的影响

将 # 1、# 2 和 # 3 共 3 种试样的电老化实验结果绘图分析, 如图 4 和表 3 所示。

表 3 为不同老化时间的纯聚乙烯、LDPE/O-MMT 和 LDPE/O-MMT/C 试样的 Weibull 击穿场强(在 30 kV/mm 的工频电场下老化)。可见电老化过程使聚乙烯的击穿场强都有所降低, 纯聚乙烯的击穿场强随老化时间下降很快, 在 66 h 后下降近 10.5%。LDPE/O-MMT 试样老化 66 h 后, 击穿场强仅下降 7.4%。而 LDPE/O-MMT/C 试样老化 66 h 后, 击穿场强仅下降 6.4%。不同聚乙烯/蒙脱土纳米复合材料在电老化后击穿性能方面产生明显差异可能的机理是: (1) 纯聚乙烯、LDPE/O-MMT 和 LDPE/O-MMT/C 在老化过程中, 在试样中出现了不同程度的聚乙烯分子链化学降解, 产生低密度区, 使击穿场强均有所降低。(2) 纳米蒙脱土具有较大的比表面积、较高的表面能和化学活性, 当它加入聚合物中, 与聚合物分子链间产生较强的相互作用, 同时还可能存在氢键等次分子键的作用, 在聚乙烯分子链间起到“物理交联点”的作用。这个作用导致聚乙烯分子链的老化降解受阻, 而使 LDPE/O-MMT 的击穿场强下降较少。特别是加入的相容剂改进了纳米片层在基体聚合物中的分散性, 进一步

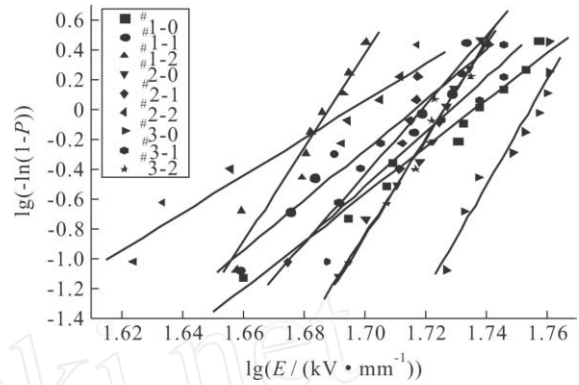


图 4 不同试样不同老化时间击穿数据的 Weibull 分布曲线

Fig. 4 Weibull distribution curve of breakdown data with different samples and ageing time

表 3 电老化后不同试样交流击穿场强的 Weibull 参数  
Tab. 3 Weibull parameters of AC breakdown strengths after ageing

试样	Weibull 参数	
	Weibull 击穿场强 $E_b$ / (MV $\cdot$ m $^{-1}$ )	形状参数
# 1-0(老化 0 h)	54.70	15.64
# 1-1(老化 36 h)	52.24	16.70
# 1-2(老化 66 h)	48.98	31.23
# 2-0(老化 0 h)	53.70	31.69
# 2-1(老化 36 h)	52.60	23.0
# 2-2(老化 66 h)	49.77	12.41
# 3-0(老化 0 h)	57.15	35.13
# 3-1(老化 36 h)	53.74	18.12
# 3-2(老化 66 h)	53.46	32.44

增加了材料的均匀性<sup>[14]</sup>, 而能使“物理交联点”的数量更多, 从而使 LDPE/O-MMT/C 的 Weibull 击穿场强下降得更少。

### 2.5 绝缘电导性能的分析

图 5 示出了 3 种试样的体积电阻率  $\rho_v$  随温度变化的曲线。从图 5 中曲线可以看出: (1) # 1 试样纯聚乙烯的体积电阻率  $\rho_v$  随温度的增加而单调降低, 这与离子电导随温度而呈指数增加的机理是一致的。但是, 聚乙烯与蒙脱土复合的 # 2、# 3 试样则都表现出先升后降的特殊现象, # 2、# 3 试样的峰值出现在约 60 °C 附近。(2) 在 40 °C 以前, 2 种聚乙烯/蒙脱土复合材料试样的  $\rho_v$  值都低于纯聚乙烯试样的  $\rho_v$  值。(3) 当试验温度为 50 ~ 60 °C 时, 2 种复合材料的  $\rho_v$  值都明显高于 # 1 试样纯聚乙烯的  $\rho_v$  值, 虽然温度继续升高至 80 °C 以后, # 2 试样的  $\rho_v$  值开始降为与 # 1 相近, 但是, 加入相容剂的 # 3 试样的

$\rho_V$ 值仍然明显高于其它2种试样。

#2、#3两种纳米复合材料具有特殊电导性能的原因可能是:(1)蒙脱土中的无机和有机阳离子在与聚乙烯熔融共混后成为复合材料中的导电载流子,使复合材料离子载流子浓度提高,因此,复合材料试样的电导率都高于#1试样的电导率,这与低温的试验结果一致。(2)分散在聚合物中的纳米粒子总是优先占据非晶区,因此减少了聚乙烯中的自由体积。由于自由体积减小,阻碍离子质量迁移,因此,电导率会显著降低<sup>[15]</sup>; (3)高聚物离子电导与分子运动、凝聚态结构密切相关。交联度提高和自由体积减少都会使聚合物电导活化能提高。由于蒙脱土片层在聚合物基体中就像一个大而坚硬的交联面,相当于交联点数目增加<sup>[16]</sup>,因此,纳米复合材料活化能提高。上述分析通过我们的热激电流(TSC)试验得到证实<sup>[17,18]</sup>。

### 2.6 电击穿对介质结构的影响

将电击穿后的3种试样各随机选出1个试样,利用SEM观察电击穿后对击穿点周围介质的损伤,试验结果如图6所示。由图6可以看出,击穿后介质在强电场作用下,LDPE/O-MMT/C的微裂纹明显少于低密度聚乙烯LDPE的,这也是LDPE/O-MMT/C的绝缘电阻和介电强度比较高的一个可能的原因:由于纳米粒子的表面效应和小尺度效应,纳米蒙脱土粒子在聚乙烯分子链之间起到了“交联点”的作用,在聚乙烯分子链之间形成了很强的相互作用,使材料的结构更加紧密,限制了分子链段的运动,这也证实了前面的分析。

### 3 结论

本文通过对纳米蒙脱土/聚乙烯复合材料介电强度和电导特性的研究,可得出如下结论:

a)在混炼温度为423 K时,更有利于聚乙烯熔融插层进入蒙脱土的片层间,形成LDPE/O-MMT纳米复合材料。

b)LDPE/O-MMT纳米复合材料可以在纳米蒙脱土粒子在聚乙烯分子链之间形成“交联点”提高聚乙烯耐电子轰击能力。纳米复合材料的耐电老化能力和电气强度都明显提高。

c)在60℃左右的温度下,LDPE/O-MMT纳米复合材料的绝缘电阻明显高于纯聚乙烯的。

### 参 考 文 献

[1] Ishibashi A, Kawai T, Nakagawa S, et al. A study of treeing phenomena in the development of insulation for 500 kV XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5): 695-706.

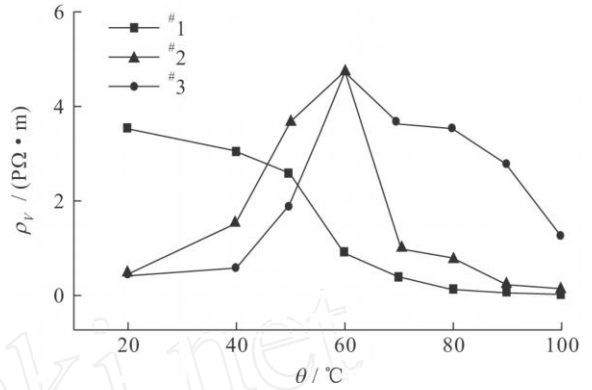


图5 不同试样绝缘电阻率  $\rho_V$  随温度变化的曲线

Fig.5 Variation curve of insulation resistivity  $\rho_V$  varying with temperature

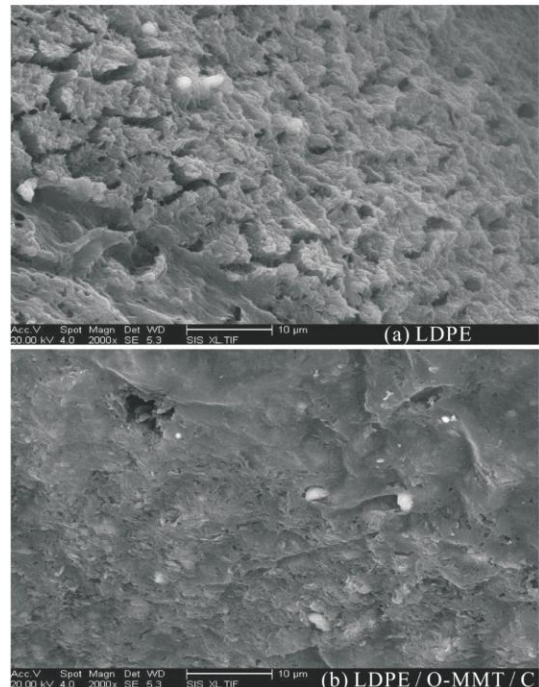


图6 2种试样电击穿后的SEM照片

Fig.6 SEM photographs of two breakdown samples

[2] Tanaka Y, Chen G, Zhao Y, et al. Effect of additives on morphology and space charge accumulation in low density polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(1): 148-154.

[3] Salah Khalil M, Cherfi A, Tourelle A, et al. Additive and electrode material on space-charge formation in polyethylene [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(6): 743-746.

[4] 王霞, 吴超一, 何华琴, 等. 茂金属聚乙烯改性低密度聚乙烯中空间电荷机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 158-162.

WANG Xia, WU Chao-yi, HE Hua-qin, et al. Study on mechanism of space charge in low density polyethylene modified by metallocene catalyzed polyethylene [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 158-162.

[5] 周远翔, 孙清华, 王宁华, 等. 空间电荷对低密度聚乙烯电气击

穿特性的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 447-450.  
 ZHOU Yuan-xiang, SUN Qing-hua, WANG Ning-hua, et al. Effects of space charges on DC breakdown in low density polyethylene[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 447-450.

[6] 王乐, 徐曼, 孙颖, 等. 纳米银/环氧树脂复合物的电阻和击穿特性研究[J]. 绝缘材料, 2006, 39(4): 37-40.  
 WANG Le, XU Man, SUN Ying, et al. Study on the resistance and electrical breakdown properties of nano silver/epoxy resin composite[J]. Insulating Materials, 2006, 39(4): 37-40.

[7] Ieda M, Nagao M, Hikita M. High-field conduction and breakdown in insulating polymers: present situation and future prospects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 934-945.

[8] Pelissou S, Bencaand P, Gross L H. Electrical properties of metallocene polyethylene [C] 2004 Internet Conference on Solid Dielectrics: Vol. 1. Toulouse, France: IEEE Press, 2004: 466-469.

[9] Montanari G C, Mazzanti G, Cacciari M J, et al. In search of convenient techniques for reducing bias in the estimation of Weibull parameters for uncensored tests[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(3): 306-313.

[10] Chauvet C, Laurent C. Weibull statistics in short-term dielectric breakdown of thin polyethylene films[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(1): 18-29.

[11] Zhang Xiaohong, Zhang Mingyan, Gao Junguo, et al. Investigation on microstructure and dielectric properties of polyethylene/montmorillonite nano-composites[C] 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials: Vol. 1. Kitakyushu, Japan: IEEE Press, 2005: 235-238.

[12] 张晓虹, 高俊国, 张金梅, 等. PE/MMT 纳米复合材料的电击穿与耐局放性能[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2124-2128.  
 ZHANG Xiao-hong, GAO Jun-guo, ZHANG Jin-mei, et al. Characteristics of electrical breakdown and partial discharge of polyethylene/montmorillonite nano-composites[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2124-2128.

[13] 吕建坤, 柯毓才, 漆宗能, 等. 插层聚合制备粘土/环氧树脂纳米复合材料过程中粘土剥离行为的研究[J]. 高分子学报, 2000(1): 85-89.  
 LU Jian-kun, KE Yu-cai, QI Zong-neng, et al. Study on intercalation and exfoliation behavior of epoxy resin in organoclay [J]. Acta Polymerica Sinica, 2000(1): 85-89.

[14] Chen J, Yin Y, Li Z, et al. Electrically pre-stressing phenomenon of high field conduction in composite of low-density polyethylene/nano SiOx[J]. Appl Phys, 2005, 44(2): 940-947.

[15] 马德柱, 何平笙, 徐种德, 等. 高聚物的结构与性能[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2004.

[16] 张明艳, 孙婷婷, 张晓虹, 等. 蒙脱土改性环氧树脂复合材料的制备及性能研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(4): 29-34.

ZHANG Ming-yan, SUN Ting-ting, ZHANG Xiao-hong, et al. Study on preparation and properties of organic-montmorillonite modified epoxy nanocomposites [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(4): 29-34.

[17] 武宇波, 李入鹏, 高俊国, 等. 蒙脱土改性聚乙烯复合材料的高场介电性能研究[J]. 绝缘材料, 2007, 40(3): 41-44.  
 WU Yu-bo, LI Ru-peng, GAO Jun-guo, et al. Study on dielectric properties of polyethylene/montmorillonite nanocomposites in high field[J]. Insulating Materials, 2007, 40(3): 41-44.

[18] 李长明, 李入鹏, 高俊国, 等. 聚乙烯/蒙脱土纳米复合材料的电老化性能[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007, 12(3): 152-155.  
 LI Chang-ming, LI Ru-peng, GAO Jun-guo, et al. Electrical endurance of polyethylene/montmorillonite nano-composites [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2007, 12(3): 152-155.



ZHANG Xiao-hong  
Ph. D., Professor

**张晓虹**

1958 一,女,博士,教授,博导  
 研究方向为工程电介质理论及应用技术  
 电话:(0451)86390136  
 E-mail:x\_hzhang2002@sina.com



GAO Jun-guo  
Ph. D. candidate

**高俊国**

1980 一,男,博士生  
 研究方向为高电压与绝缘技术  
 电话:(0451)86396246  
 E-mail:gaojunguo@hrbust.edu.cn



GUO Ning  
Ph. D. candidate

**郭宁**

1980 一,男,博士生  
 研究方向为高电压与绝缘技术  
 电话:(0451)86396246  
 E-mail:tad@hrbust.edu

收稿日期 2008-11-20 修回日期 2008-12-01 编辑 李东