

纳米碳化硅/硅橡胶复合物非线性电导特性研究*

王飞风 张沛红[†] 高铭泽

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 电介质工程国家重点实验室培育基地, 哈尔滨 150080)

(2014年3月28日收到; 2014年6月26日收到修改稿)

将纳米碳化硅填加到硅橡胶中, 可以获得具有非线性电导特性的纳米碳化硅/硅橡胶复合物。本文研究了质量分数分别为 5 wt%, 15 wt%, 30 wt%, 45 wt% 的纳米碳化硅/硅橡胶复合物的非线性电导特性, 建立了电导率与场强的函数关系, 分析了复合物的非线性电导机理, 并测试了复合物的介电谱特性和击穿特性。为了探讨非线性碳化硅/硅橡胶复合物应用于电缆终端和复合绝缘子以均匀其电场分布的可能性, 应用 COMSOL Multiphysics 软件, 对电缆终端和复合绝缘子中的电场分布进行了仿真分析。仿真结果表明, 将纳米碳化硅/硅橡胶复合物应用于电缆终端应力锥的绝缘部分, 以及应用于复合绝缘子的端部, 可以有效地降低其最大场强。

关键词: 纳米碳化硅/硅橡胶复合物, 非线性电导特性, 电场仿真

PACS: 78.67.Sc, 72.20.Ht, 87.55.Gh

DOI: 10.7498/aps.63.217803

1 引言

纳米科学技术的发展为新材料的开发和对现有材料的改性提供了新的思路和途径, 1994年 Lewis 首先提出了纳米介质(nanometric dielectrics)的概念^[1], 2001年 Frechette 等对此作了进一步的讨论(称为 nanodielectrics)^[2]。纳米介质的出现, 开辟了电介质新的应用领域, 与传统介质比较, 纳米复合介质的电、热、机械性能有了很大的改善^[3-7]。

从 20 世纪 90 年代开始, 国内外学者对纳米填充物改善聚合物性能的问题作了广泛研究, 目前已经在聚合物如聚乙烯、硅有机树脂、环氧树脂、聚酰胺和聚酰亚胺, 填充物如三氧化二铝(alumina, Al_2O_3)、二氧化钛(titania, TiO_2)、二氧化硅(silica, SiO_2) 和层状硅酸盐(layered silicates)等的研究方面取得了很多结果, 在聚合物中填加非线性纳米无机物, 如纳米氧化锌(ZnO)、碳化硅(SiC)等制成非线性复合材料的研究也取得了一定的进展。非线性复合材料的电导率随着外加场强的改变呈现出非

线性变化, 在场强达到一定值时, 电导率表现出很强的场强依赖关系, 这一特性可以改善高压电气设备绝缘中的电场分布^[8-11]。

复合材料的微观结构决定了载流子的输运过程。非线性复合介质中由于添加了非线性无机半导体材料, 载流子的传输过程更为复杂, 涉及到多种导电机理。文献[8]研究了纳米 p-SiC/硅橡胶复合物的非线性导电机理, 以体积分数为 25%, 粒径为 50 nm 的碳化硅/硅橡胶复合物为例, 通过测试复合材料的电导电流(J)与场强(E)的关系、介电谱特性以及空间电荷特性, 认为, 1) 从场助热电子发射电极注入方面分析, 由于纳米碳化硅/硅橡胶复合物的 $J-E$ 特性具有很强的温度依赖性, 因此排除了隧道注入和肖特基(Schottky)注入机理。2) 从隧道效应方面分析, 当复合物中碳化硅颗粒间的硅橡胶层足够薄, 局部场强很大时, 载流子会由于隧道效应通过薄的橡胶层。但是经过计算得出纳米碳化硅/硅橡胶复合物中的局部场强和碳化硅粒子之间硅橡胶层厚度不满足发生隧道效应的条件, 从而排除隧道效应机理。3) 从普尔-弗兰凯

* 国家自然科学基金(批准号: 51277044)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)(批准号: 2012CB723308)资助的课题。

† 通讯作者。E-mail: zph@hrbust.edu.cn

尔(Poole-Frenkel)效应方面分析,根据莫特-格尼(Mott-Gurney)模型,空间电荷限制电流的非线性系数大约为2,比测得的纳米碳化硅/硅橡胶复合物的非线性电导系数小得多,因此排除了普尔-弗兰凯尔机理。4)载流子跃迁通过硅橡胶层可由变程跃迁或最邻近跃迁方式完成,因为变程跃迁是在低温情况下发生,所以排除了变程跳跃机理。经过对多种可能的导电机理的分析,最后得出通过薄硅橡胶层的最邻近空穴跃迁是纳米碳化硅/硅橡胶复合物的主要的非线性导电机理。文献[12]对非线性无机纳米碳化硅、氧化锌复合聚乙烯材料的导电性的研究认为,复合物是由大量的“聚合物-界面-填料”单元串联组成的,同时认为界面层所形成的势垒影响载流子的输运过程。

本文以纳米碳化硅/硅橡胶复合物为研究对象,通过实验测得纳米碳化硅/硅橡胶复合物的电导率与场强关系,讨论了纳米碳化硅含量和温度对复合物非线性电导特性的影响,利用COMSOL Multiphysics软件仿真分析了纳米碳化硅/硅橡胶复合物应用于电缆终端和复合绝缘子的均匀电场分布作用。

2 实验

2.1 试样制备

采用上海硅山高分子材料有限公司生产的室温硫化硅橡胶和北京德科岛金科技有限公司生产纳米碳化硅制备试样,纳米碳化硅为 β 晶型,平均粒径40 nm。将纳米碳化硅加入硅橡胶中并将硅橡胶、交联剂和催化剂按一定比例混合,在真空干燥箱中去除气泡固化制成试样。分别制备了纯硅橡胶和质量分数分别为5 wt%, 10 wt%, 15 wt%, 20 wt%, 30 wt% 和 45 wt% 的纳米碳化硅/硅橡胶复合物,试样厚度400 μm 。

2.2 纳米碳化硅、硅橡胶复合物的电导率特性

2.2.1 测试方法

利用三电极系统分别测试了纯硅橡胶和5 wt%, 15 wt%, 30 wt%, 45 wt% 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的电导率特性。三电极中主电极直径50 mm,与保护极之间的间隙2 mm。高压直流电

源最大输出电压10 kV,施加电压30 min后利用EST122皮安电流表记录稳态电流。

纳米碳化硅/硅橡胶复合物电导率与场强关系的经验公式为

$$\gamma = \alpha E^\beta, \quad (1)$$

式中, β 是材料的非线性电导系数, α 是一个与材料属性和结构有关的参数,对(1)式取对数变换为

$$\lg \gamma = \lg \alpha + \beta \lg E. \quad (2)$$

2.2.2 实验结果及分析

纯碳化硅的电导率与场强的关系如图1所示,可以看出,碳化硅的电导率特性曲线在电场强度为0.114 kV/mm时出现拐点,拐点之前,电导率的非线性系数为0.33,拐点之后,电导率的非线性系数为2.3。

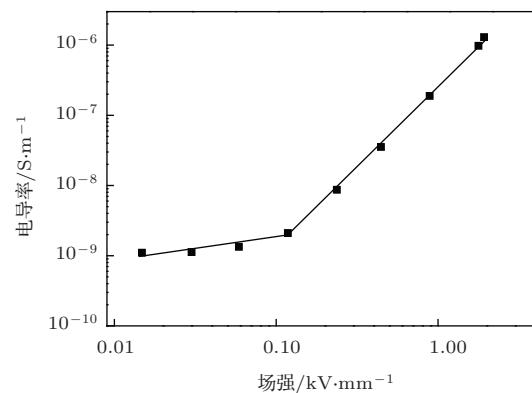


图1 纳米碳化硅的电导率与场强的关系

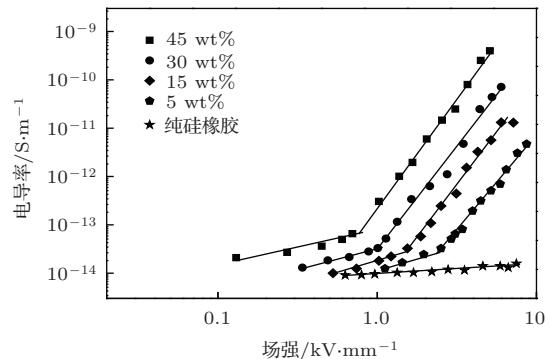


图2 不同纳米碳化硅含量的复合物电导率与场强的关系

图2为质量分数分别为5 wt%, 15 wt%, 30 wt%, 45 wt% 的纳米碳化硅/硅橡胶复合物的电导率特性,可以看出,随着纳米碳化硅含量的增加,复合物的电导率增加,出现拐点的场强降低。

表1 为不同纳米碳化硅含量的复合物在拐点前后的非线性系数 β_1 , β_2 和拐点对应的场强.

表1 不同碳化硅含量的纳米碳化硅/硅橡胶复合物的非线性电导系数和拐点场强

碳化硅含量/wt%	β_1	β_2	拐点场强/(kV/mm)
45	0.604	4.309	0.673
30	0.690	4.227	1.026
15	1.012	4.171	1.563
5	0.959	3.954	2.564

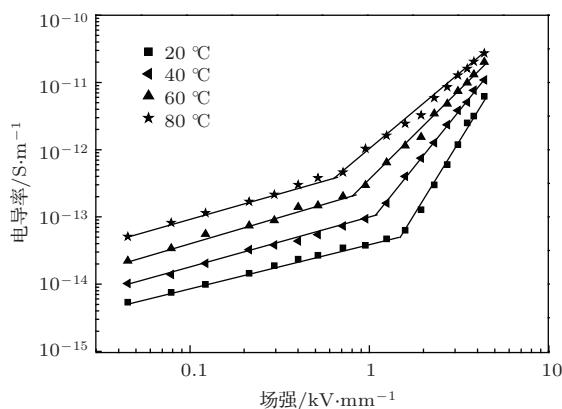


图3 不同温度下30 wt% 碳化硅含量复合物的电导率与场强关系

图3和图4分别为30 wt% 和45 wt% 纳米碳化硅含量的复合物在20, 40, 60, 80°C时电导率与场强的关系, 可以看出, 在同一碳化硅含量、同一场强下, 随着温度的增加, 复合物的电导率增加, 电导率特性曲线出现拐点的场强减小, 拐点之后的非线性电导系数减小.

30 wt% 和45 wt% 碳化硅含量的纳米碳化硅/硅橡胶复合物在不同温度下拐点前后的非线性电导系数列于表2中.

通常, 复合物的非线性电导特性机理在逾渗阈值以下, 可以用隧道效应或载流子跃迁机理解释, 在逾渗阈值以上, 当复合物中的纳米颗粒互相接触形成连通路径, 非线性行为是载流子隧穿或颗粒

间双肖特基势垒场助热离子发射的结果, 此外, 电极的肖特基注入、普尔-弗兰凯尔发射以及空间电荷限制电流等都对复合物的非线性电导特性起作用 [13].

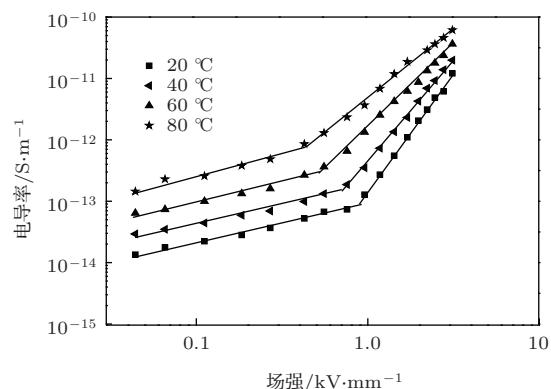


图4 不同温度下45 wt% 碳化硅含量复合物的电导率与场强关系

在外加电场作用下, 由于肖特基效应减小了势垒高度, 会发生阳极空穴或阴极电子的注入(与碳化硅类型有关), 如果注入的是空穴, 空穴会通过在靠近价带尾的最近相邻定域态间跃迁穿过硅橡胶层, 然后穿过具有大的电导的碳化硅的价带, 再由碳化硅的价带发射到相邻硅橡胶层中, 经过不断的跳跃传输, 最终和阴极的电子结合. 同样, 从阴极发射的电子, 通过在硅橡胶层的导带尾中的最近跃迁, 跳跃到碳化硅的导带尾, 再跳跃通过硅橡胶层的导带尾, 经过不断的跳跃传输最终和阳极的空穴结合. 对于其他复合物, 跃迁发生在临近费米能级带隙的中部 [8,14].

假设纳米碳化硅在硅橡胶基体中均匀分散, 借助(3)式可以求出两碳化硅粒子之间的硅橡胶层的厚度 [8,15]

$$l = \frac{d}{2} \left[\left(\frac{4\pi}{3f} \right)^{1/3} - 2 \right], \quad (3)$$

式中, d 为纳米碳化硅的粒径, f 为碳化硅的体积分数.

表2 不同温度下30 wt% 和45 wt% 碳化硅含量纳米碳化硅/硅橡胶复合物的非线性电导系数

温度/°C	30 wt% 纳米碳化硅含量复合物		45 wt% 纳米碳化硅含量复合物	
	β_1	β_2	β_1	β_2
20	0.729	4.138	0.583	3.943
40	0.611	3.47	0.532	3.192
60	0.489	2.775	0.526	2.757
80	0.404	2.294	0.446	1.848

计算得 5 wt%, 10 wt%, 15 wt%, 20 wt%, 30 wt% 含量纳米碳化硅/硅橡胶复合物的平均碳化硅粒子间硅橡胶层厚度分别为 37.845, 22.227, 15.120, 10.059, 4.348 nm.

此外, 利用公式

$$E_1 \approx E_0(1 + d/l) \quad (4)$$

可以求出碳化硅粒子之间硅橡胶层中的电场强度 E_1 与整个试样内电场强度 E_0 的比值^[8]. (4) 式中, d, l 同(3)式.

5 wt%, 10 wt%, 15 wt%, 20 wt%, 30 wt% 含量纳米碳化硅/硅橡胶复合物 E_1/E_0 的比值分别为 2.057, 2.799, 3.6464, 4.97, 10.199. 可以看出随着纳米碳化硅含量的增加, 碳化硅粒子之间硅橡胶层厚度减小, 承受的场强增加.

纳米碳化硅掺杂量较小时, 复合物中碳化硅粒子间的平均距离较大, 载流子不易传输, 非线性特性小. 纳米碳化硅掺杂量较大时, 纳米碳化硅粒子之间的距离变小, 非线性特性明显, 当含量达到 45% 时, 会出现纳米碳化硅粒子相互接触, 形成导电通道, 非线性电导特性更明显.

随着电压的增加, 相邻纳米碳化硅粒子间硅橡胶层的场强增加, 可能发生隧道效应, 载流子直接穿越硅橡胶层, 从而形成大的导电电流.

随着温度的升高, 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的电导率增加, 主要是因为碳化硅的禁带比较窄(2.2 eV), 导带内的部分电子能够受热激发越过禁带进入导带而成为自由电子参与导电, 而在导带中剩下的空穴也可导电, 大大增加了碳化硅的导电性. 此外, 复合物非线性电导特性随温度升高而下降, 是因为一方面, 非线性电导电流与载流子跃迁的概率有关, 随着温度增加跃迁概率减小, 另一方面, 电流密度与 eRE/kT (式中 e 为电子电荷量, R 为定域态间的平均距离, 即平均跃迁距离, E 为场强, k 为 Boltzmann 常数, T 为温度) 有关^[8], 可以看出, 随着温度升高, 非线性电导系数下降, 且与电场强度有关.

2.3 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的介电谱特性

用宽频介电谱仪 Concept 80 测试了不同碳化硅含量的纳米碳化硅/硅橡胶复合物的介电谱特性.

2.3.1 介电常数

不同碳化硅含量的纳米碳化硅/硅橡胶复合物的介电常数与频率的关系如图 5 所示, 从图中可以

看出, 在频率大于 1 Hz 小于 1 MHz 时, 复合物的介电常数随频率的增加而降低, 随纳米碳化硅含量的增加而增加, 当频率小于 0.3 Hz 时, 纯硅橡胶的介电常数大于 5wt% 和 15wt% 含量的纳米硅橡胶复合物, 说明在此频率范围内, 掺入少量的纳米碳化硅会降低复合物的介电常数. 50 Hz 频率时, 纯硅橡胶、5 wt%, 15 wt%, 30 wt%, 45 wt% 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的介电常数分别为 2.9, 3.1, 3.7, 4.5, 5.7.

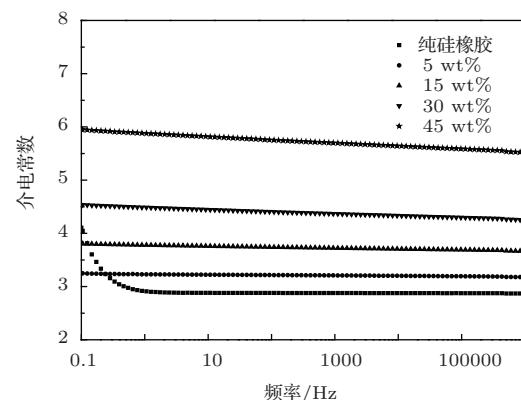


图 5 不同纳米碳化硅含量的硅橡胶复合物介电常数与频率的关系

2.3.2 介质损耗角正切

图 6 为不同纳米碳化硅含量的硅橡胶复合物的介质损耗角正切与频率的关系. 当频率大于 500 Hz 时, 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的介质损耗角正切随碳化硅含量的增加而增加, 主要因为在此频率下, 电导损耗起主要作用, 添加了纳米碳化硅的硅橡胶复合物的电导比纯硅橡胶大; 当频率小于 500 Hz 时, 随频率的降低, 纯硅橡胶和纳米碳化硅/硅橡胶复合物的介质损耗角正切增加, 且当频率小于 1 Hz 时, 高碳化硅含量复合物的介质损耗角正切小

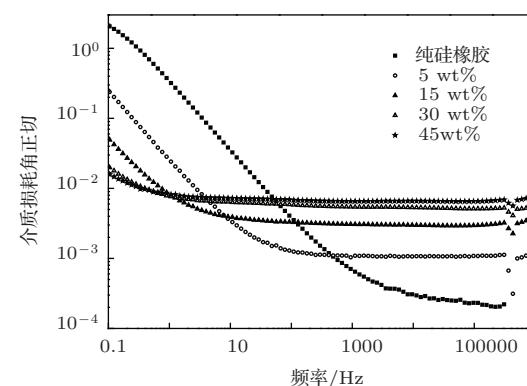


图 6 不同纳米碳化硅含量的硅橡胶复合物的介质损耗角正切与频率的关系

于低碳化硅含量复合物, 是因为在此频率区间, 复合物中偶极子转向极化起主要作用。纳米碳化硅的加入, 限制了偶极子的转向极化, 碳化硅含量越高, 偶极子转向极化越困难。

2.4 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的击穿特性

测试了纯硅橡胶和5 wt%, 10 wt%, 15 wt%, 20 wt% 碳化硅含量的纳米碳化硅/硅橡胶复合物在交流电压下的击穿场强, 用二参数威布尔分布对实验数据处理分析, 得到纯硅橡胶和纳米碳化硅含量为5 wt%, 10 wt%, 15 wt%, 20 wt% 的复合物的击穿场强如图7所示。

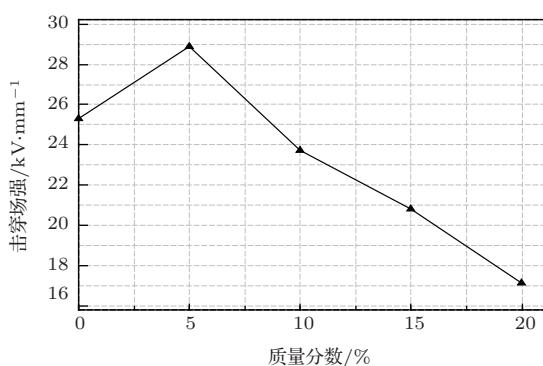


图7 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的击穿场强与碳化硅含量的关系

从图7可以看出, 当碳化硅含量为5 wt% 时, 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的击穿场强达到最大值, 随着碳化硅含量的继续增加复合物的击穿场强下降。击穿场强出现最大值是由于纳米碳化硅的加入, 在硅橡胶基体中引入大量陷阱, 使载流子的自由行程减小, 自由体积减小, 提高了材料的固有介电强度, 但当碳化硅含量继续增加时, 纳米颗粒会相互重叠, 出现逾渗现象, 使复合物的击穿场强下降。

3 电缆终端电场仿真分析

3.1 模型建立

图8为电力电缆终端结构示意图, 电缆终端主要包括导体、电缆绝缘、应力锥和外绝缘。应力锥由导电部分和绝缘部分组成, 本文尝试采用具有非线性电导特性的纳米碳化硅/硅橡胶复合物代替应力锥的绝缘部分以改善电缆终端的电场分布。采用COMSOL Multiphysics软件对电缆终端的电场分布进行仿真分析, 由于电缆终端具有轴对称结构,

所以在仿真建模时, 采用二维轴对称AC/DC模块。

仿真分析中非线性材料的介电常数按图5中相应的介电常数选取, 电导率按数据拟合获得的参数设定。

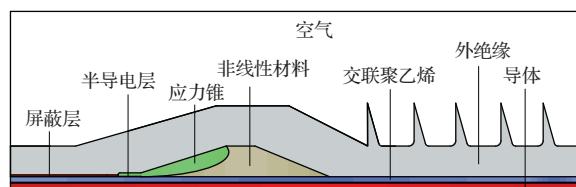


图8 (网刊彩色) 电缆终端结构示意图

3.2 仿真结果及分析

图9为用不同电导率的材料替代应力锥绝缘部分材料时电缆终端电场分布, 从图中可以看出,

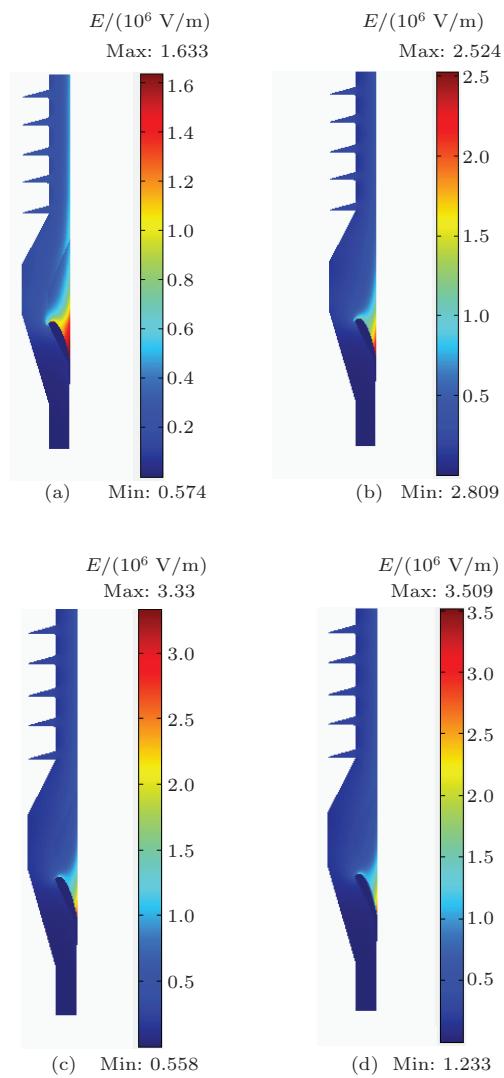


图9 (网刊彩色) 电缆终端的电场分布 (a) 45 wt% 碳化硅含量复合物; (b) 30 wt% 碳化硅含量复合物; (c) 15 wt% 碳化硅含量复合物; (d) 纯硅橡胶

采用 45 wt% 碳化硅含量的纳米碳化硅/硅橡胶复合物时, 应力锥与主绝缘边界处最大场强为 1.633 kV/mm, 而未使用非线性材料时的最大场强为 3.509 kV/mm. 可见, 在应力锥中使用纳米碳化硅/硅橡胶复合材料, 可以降低电缆终端中的最大场强.

4 复合绝缘子电场仿真分析

4.1 模型建立

为均匀复合绝缘子高压端和接地端附近的场强, 在绝缘子两端使用非线性纳米碳化硅/硅橡胶复合材料, 图 10 为绝缘子结构示意图, 绝缘子距离 1000 mm, 爬电距离 3150 mm. 绝缘子具有轴对称结构, 利用 COMSOL Multiphysics 二维轴对称 AC/DC 模块对绝缘子进行仿真分析, 非线性材料的介电常数和电导率与上述电缆终端相同.

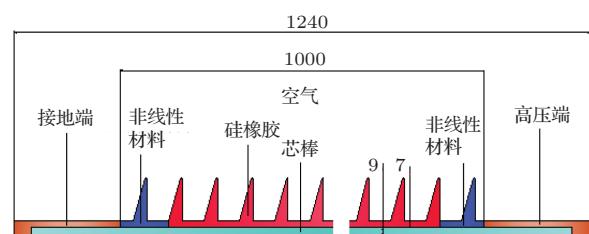


图 10 (网刊彩色) 绝缘子几何结构和尺寸

4.2 仿真结果及分析

复合绝缘子表面的电位分布如图 11 所示, 从图中可以看出, 非线性绝缘材料的使用对电位分布影响不大.

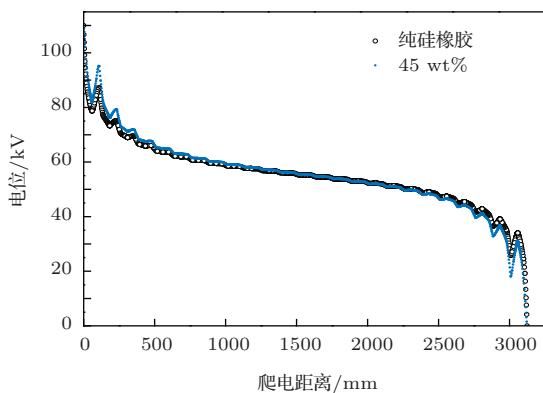


图 11 (网刊彩色) 沿绝缘子表面的电位分布

图 12 为复合绝缘子接地端区域的电场分布和电位分布, 从图中可以看出, 采用 45 wt% 碳化硅

含量的纳米碳化硅/硅橡胶复合物的绝缘子端部电位梯度比未使用非线性材料时小得多.

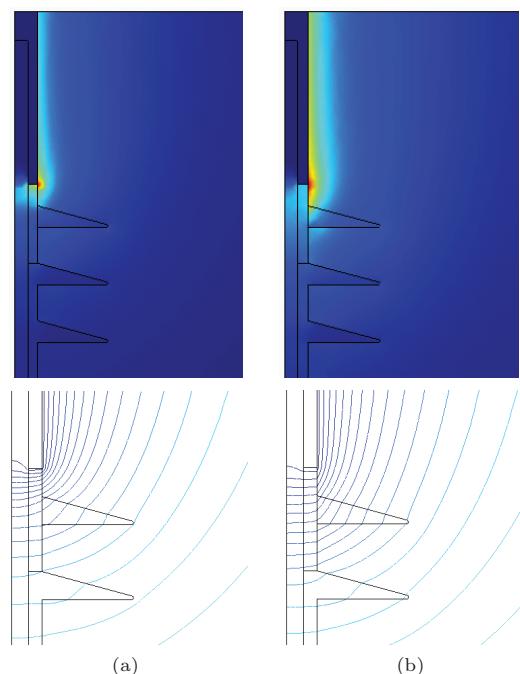


图 12 (网刊彩色) 绝缘子接地端电场分布云图和等位分布图 (a) 纯硅橡胶; (b) 45 wt% 碳化硅含量复合物

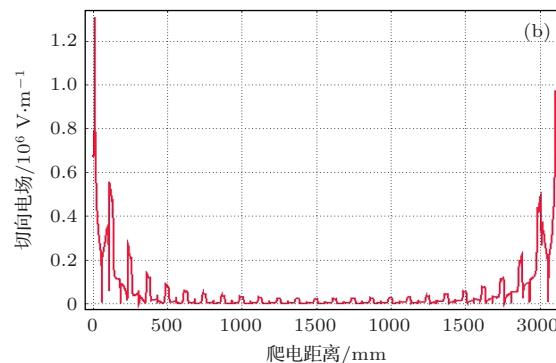
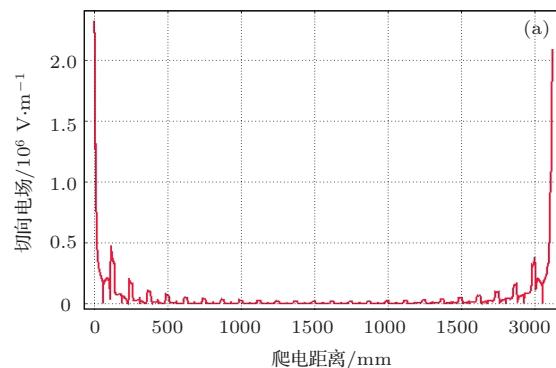


图 13 沿绝缘子表面的切向电场分布 (a) 纯硅橡胶绝缘子; (b) 45 wt% 碳化硅含量的硅橡胶复合绝缘子

图 13 为沿绝缘子表面的切向电场分布, 可以看出, 沿绝缘子表面电场分布极不均匀. 未使用非

线性材料时, 绝缘子高压端最大的切向场强为 2.33 kV/mm, 接地端最大的切向场强为 2.09 kV/mm。当使用 45 wt% 纳米碳化硅/硅橡胶复合物时, 高压端和接地端的最大切向场强分别降低到 1.33 kV/mm 和 0.96 kV/mm, 绝缘子的高压端和接地端电场分布得到了明显的改善。

5 结 论

1) 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的电导率随纳米碳化硅含量的增加而增加, 当场强达到一定值时, 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的电导率具有很强的电场依赖性。在同一场强下, 同一含量纳米碳化硅/硅橡胶复合物的电导率随温度的增加而增加, 非线性电导系数降低。

2) 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的介电常数随碳化硅含量的增加而增加, 复合物的介质损耗角正切在频率大于 500 Hz 时, 随碳化硅含量的增加而增加, 频率小于 1 Hz, 随碳化硅含量的增加而降低。

3) 纳米碳化硅/硅橡胶复合物的击穿场强在碳化硅含量为 5wt% 时达到最大值, 随着碳化硅含量的继续增加, 击穿场强下降, 低于纯硅橡胶的击穿场强。

4) 提出了利用非线性纳米碳化硅/硅橡胶复合物改善电缆终端及复合绝缘子端部电场分布的方法, 仿真结果表明, 45wt% 含量的纳米碳化硅/硅橡胶复合物能有效改善电缆终端应力锥处电场分布和减小复合绝缘子高压端和接地端的最大场强。

参考文献

- [1] Lewis T J 1994 *IEEE Trans. on DEI*. **1** 812

- [2] Frechette M F, Trudeau M, Alamdari H D, Boily S 2001 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* Kitchener, Ontario, Canada, October 14–17, 2001 p92
- [3] Nelson J K, Fothergill J C, Dissado L A, Peasgood W 2002 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Cancun, Quintana Roo, Mexico, October 20–24, 2002 p295
- [4] Nelson J K, Fothergil J C 2004 *Nanotechnology* **15** 586
- [5] Irwin P C, Cao Y, bansal A, Schadler L S 2003 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Albuquerque, NM, USA, October 19–22, 2003 p120
- [6] Castellon J, Nguyen H N, Agnel S, Toureille A, Frechette M, Savoie S, Krivda A, Schmidt L E 2011 *IEEE Trans. on DEI* **18** 651
- [7] Yue L, Wu Y, Sun C, Shi Y, Xiao J, and He S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 076103
- [8] Wang X, Nelson J K, Schadler L S 2010 *IEEE Trans. on DEI* **17** 1687
- [9] Vanga-Bouanga C, Frechette M, David E 2013 *IEEE Trans. on DEI* **20** 1453
- [10] Bouanga C V, Savoie S, Frechette M F, Couderc H, David E 2012 *Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, San Juan, Puerto Rico June 10–13, 2012 p43
- [11] Ma K, Li H, Zhang H, Xu X, Gong M, Yang Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1942
- [12] Guo W M 2010 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin University of Science and Technology) (in Chinese) [郭文敏 2010 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨理工大学)]
- [13] Jože Furlan 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 7604
- [14] Mizutani T 2006 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Kansas, MO, USA, October 15–18, 2006 p10
- [15] Jing X, Zhao W, Lan L 2000 *J. Mater. Sci. Lett.* **19** 377

Research on the nonlinear conductivity characteristics of nano-SiC/silicone rubber composites*

Wang Fei-Feng Zhang Pei-Hong[†] Gao Ming-Ze

(College of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, State Key Laboratory

Cultivation Base of Dielectrics Engineering, Harbin 150080, China)

(Received 28 March 2014; revised manuscript received 26 June 2014)

Abstract

Nano-silicon carbide/silicone rubber composites with nonlinear conductivity characteristics have been made by mixing nano-sized silicon carbide (SiC) into silicone rubber. In this paper, the nonlinear conductivity characteristics of composites made by mixing 5 wt%, 15 wt%, 30 wt% and 45 wt% of nano-SiC and silicone rubber are investigated. The relationship between conductivity and electric field strength is obtained by experiments. Nonlinear conductivity mechanisms of the composites are analyzed, and their breakdown properties and dielectric spectroscopy characteristics of composites are studied. In order to know the effect of nonlinear SiC/silicone rubber composites on homogenizing electric field, the electric stress distribution of cables termination and composite insulators are simulated by the COMSOL Multiphysics software. Results show that the maximum electric field strength at cable termination and the end of the composite insulators decreases efficiently when the nano-SiC/silicone rubber composites are used.

Keywords: nano-SiC/silicone rubber composites, nonlinear conductivity characteristics, electric field simulation

PACS: 78.67.Sc, 72.20.Ht, 87.55.Gh

DOI: 10.7498/aps.63.217803

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51277044), and the National Basic Research Program of China(Grant No. 2012CB723308).

† Corresponding author. E-mail: zph@hrbust.edu.cn