第 49 卷 第 2 期：461-471 高电压技术 Vol.49, No.2: 461-471
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221200

非线性电导聚合物材料研究进展

张镱议[1]，马海帮[1]，王　倩[2]，刘捷丰[1]，查俊伟[3]
（1. 广西大学广西电力输配网防雷工程技术研究中心，南宁 530004；2. 西安理工大学电气工程学院，西安 710048；3. 北京科技大学化学与生物工程学院北京材料基因工程高精尖创新中心，北京 100083）

摘　要：空间复杂辐射环境料可以保证正常情况(弱带电时)下的高绝缘性能，又能在高场强下以暂态高电导释放介质内部危险电下，高能带电粒子引起的航天器介质深层充放电效应是导致航天器故障的主要因素之一。研究表明，具有非线性 *I-U* 特性的复合材料可有效抑制航天器介质深层充放电。为此分析了非线性电导复合材料用于抑制航天器介质深层充放电的可行性，并从导电机理、改性方法、应用现状等方面阐述研究进展，并对非线性电导航天器介质的发展方向进行展望。分析结果表明：复合材料的非线性电导受多种电荷输运机制影响，非线性电导复合材料的制备工艺逐渐完善，并实现了从简单材料制备向仿真计算、空间环境地面模拟试验的突破。下一步的研究重点在于空间环境下的导电机理，材料制备和仿真计算、试验的协同性，仿真模型和多源模拟试验条件的优化。
关键词：聚合物材料；非线性电导；导电机制；空间电荷；材料改性

Research Progress of Nonlinear Conductivity Polymer Materials

ZHANG Yiyi[1], MA Haibang[1], WANG Qian[2], LIU Jiefeng[1], ZHA Junwei[3]
(1. Guangxi Power Transmission and Distribution Network Lightning Protection Engineering Technology Research Center, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, School of Chemistry and Biological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract：The deep charging and discharging of spacecraft dielectrics caused by high energy charged particles under complex space radiation environment is one of the main factors leading to the failure of spacecraft. Studies have shown that the composite materials with nonlinear *I-U* characteristics can inhibit deep charging and discharging of spacecraft dielectrics are inhibited. In this paper, the feasibility of nonlinear conductivity polymer materials inhibiting deep charging and discharging of spacecraft dielectrics were analyzed. Besides, the conductive mechanism, modification method and application of nonlinear conductivity polymer materials were introduced. The research prospect and development trend of nonlinear conductivity spacecraft dielectrics were expounded. The results show that the nonlinear conductivity of composites is affected by a variety of charge transport mechanisms. The preparation technology of nonlinear conductivity composites has been improved, and a breakthrough has been achieved from simple material preparation to simulation calculation and ground-based simulation for space environment. The next key research contents will include conductive mechanism in space environment, the collaboration between material preparation and simulation calculation, experiment, and the optimization of simulation model and multi-source simulation experiment conditions.
Key words：polymer materials; nonlinear conductivity; conductive mechanism; space charge; material modification

0　引言

聚合物介质材料被广泛应用于航空航天领域，航天器介质深层充放电问题一直以来都是航天器可靠性和寿命的重大威胁。空间辐射环境下，高能带电粒子穿透航天器的屏蔽层，在航天器介质内部沉积，导致局部场强集中，最终在介质内部产生威胁航天器安全运行的脉冲放电和高频电磁波，引发电源系统、控制系统故障，甚至对仪器和航天器结构造成破坏，严重影响航天器的安全稳定运行[1-5]。为了保证我国航天领域的发展，航天器介质深层充放电防护技术的研究刻不容缓。

基金资助项目：国家自然科学基金(52277022；51867003)；八桂青年学者专项(20200659)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52277022, 51867003), Guangxi Bagui Young Scholars Special Funding(20200659).

航天器介质深层充电本质是高能电子引起的电荷注入速率和电荷释放速率的竞争过程。随着电荷的积聚，介质内部场强提高引起电导率增大，电荷释放速率加快，直至与电荷注入速率达到动态平衡。由于航天器介质的高阻抗特性，电导率随场强变化很小，充电平衡场强高于介质的击穿强度，引发威胁性的静电放电[6-7]。改善航天器介质深层充电关键在于抑制电荷注入和加快电荷释放。传统方法包括加装防护层和采用屏蔽技术，尽管可以减缓电荷注入，抑制航天器介质的深层充电，但是需要综合考虑航天器的重量和外形设计因素，通过大量仿真分析和试验修正，才能实现最佳保护方案，极大地增加了航天器的研发成本。因此，近年来学者们开始从航天器介质的材料改性入手，利用材料自身的导电特性解决航天器介质的深层充放电问题。

空间环境下，聚合物材料的电导率由辐射诱导电导率和本征电导率组成。随着辐射剂量的增大，辐射诱导电导率会有所提升，在介质内部空间电荷的释放过程中起重要作用。而介质的本征电导率取决于材料种类、温度、电场强度等因素，通常远小于辐射诱导电导率[8]。通过在聚合物基体中引入改性填料，可以使材料的本征电导率达到与辐射诱导电导率相同的数量级，甚至大于辐射诱导电导率，从而有效提高介质内部空间电荷的释放速率，抑制航天器介质深层充放电现象的发生。本文主要针对聚合物材料的本征电导率进行讨论，以期待可以通过材料改性的方式改善航天器深层充放电现象。

20 世纪 60 年代，就有学者提出利用具有一定电导特性的材料改善电场分布，但是关于航天器介质内部场强集中的问题并未有深入研究[9]。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration，NASA)经过研究发现，适当提高绝缘材料电导率能抑制航天器介质深层充放电[10-11]。尽管具有稳定高电导的聚合物介质材料可以提高空间电荷的泄放速率，降低介质内部场强，但是长期运行会导致较高的介质损耗和绝缘性能下降[12]。国内学者经过研究发现，采用非线性电导复合材料，可以保证其在正常工作情况下的绝缘性能，当空间电荷积聚至内部场强达到某一阈值，又能以暂态高电导提高空间电荷释放速率，从而使航天器介质内部的场强始终保持在较为安全的水平[13]。

本文重点从非线性电导聚合物材料的导电机理、改性方法、应用现状等方面阐述国内外研究进展，对非线性电导聚合物材料应用于抑制航天器介质深层充放电的发展趋势进行展望，以期待为航天器介质内带电防护提供新的参考方案。

1 非线性电导聚合物的导电机理和影响因素

非线性电导复合材料是指在高场强下，随着电场强度的增加，电流密度呈现非线性变化的材料。由于此类材料被广泛应用于自适应电场调控，因此也被称为场梯度材料(field gradient materials，FGM)和智能绝缘材料(smart insulation materials)[14]。在较低场强下，非线性电导材料具有较为稳定的电导率，电流密度和电场强度呈线性关系；当场强达到某一阈值时，随着场强 E 的增大，材料的电流密度 J 呈现指数增长，满足以下关系[15]

$$\lg J=\begin{cases}\lg K_1+\lg E, & E<E_0\\ \lg K_2+\alpha\lg E, & E\geq E_0\end{cases} \tag{1}$$

式中：K_1 和 K_2 为受材料电阻率影响的系数；α为非线性系数；电流密度开始呈现出非线性变化时的场强 E_0 被称为非线性阈值场强或压敏场强。由于在制备过程中杂质的引入，未经过改性的材料也具有一定的非线性电导特性，但是其释放电荷的能力远不及非线性电导复合材料。

非线性电导复合材料的制备主要是在聚合物基体中引入微米或纳米级的导电填料或半导体材料来实现的。探究其电导机理以及影响因素对非线性电导复合材料的制备具有重要指导意义。

1.1 非线性电导聚合物材料的导电机理

由于聚合物基体和改性填料固有结构的复杂性，目前并没有统一的理论可以解释非线性电导复合材料的导电机理。学者们大多采用现有的一种或者几种理论解释复合材料的导电机理，尽管在内容上有偏差，但还是围绕以下几种理论展开阐述。

1.1.1 肖特基效应

肖特基(Schottky)效应描述的是载流子由电极注入介质的过程：向复合材料施加电场时，电极与样品表面的势垒降低，在电极热效应的影响下，大量载流子被注入聚合物介质中，流过阴极的热电子发射电流增加，材料内部的电流密度也会随之增大[16]。电流密度 J 可以表示为

$$J=AT^2\exp\left(-\frac{\phi-\sqrt{e^3E/\left(4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{r}}\right)}}{kT}\right) \tag{2}$$

式中：e 为电子电量；ε_{r} 为相对介电常数；ε_0 为真空

介电常数；A 为 Richardson-Dushman 常数；ϕ为金属功函数；k 为 Boltzman 常数；T 为热力学温度。

1.1.2　普尔−弗兰克效应

普尔−弗兰克(Poole-Frenkel)效应描述的是载流子产生的体效应：在高场强下，施主能级可以克服捕获热发射电子的势垒，引起电子电流的增加。由于这一过程发生在介质内部，因此也被称为内肖特基效应[17]。体电导率和外加场强的关系为

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{\sqrt{e^3 E/(\pi\varepsilon_0\varepsilon_r)} - \phi_D}{kT}\right) \tag{3}$$

式中：σ 为体积电导率；σ_0 为初始电导率；ϕ_D 为势垒。

1.1.3　逾渗理论

在导电复合材料领域，逾渗理论研究的是填料掺杂量达到某一阈值时，复合材料的电导率急剧上升的现象，是一种从宏观角度解释复合材料的导电现象的理论，不涉及非线性电导的本质。典型的逾渗模型主要有经典统计的逾渗理论(Kirkpatrick-Zallen)模型、Mamunya 模型、Janzen 模型、有效介质理论(effective medium theory, EMT)等[18]。根据逾渗理论理论，当填料的含量达到渗流阈值时，在聚合物基体内形成了稳定的导电路径，半导体填料成为电荷输运的主要路径，复合材料的电导率在小范围内迅速增大；由于导电路径已经形成，填料含量的进一步提高对电导率的影响很小。基于经典统计理论，复合介质的电导率可以表示为[19]

$$\sigma = \sigma_0 (V - V_c)^s \tag{4}$$

式中：σ 为复合材料电导率，σ_0 为无机填料的电导率，V 为无机填料的体积分数，V_c 为复合材料的渗流阈值，s 为与填料形貌尺寸相关的维度指数，理论值在 1.3~2.0 之间。

1.1.4　空间电荷限制电流效应

空间电荷限制电流(space charge limited current，SCLC)效应揭示了陷阱对电荷传输过程的影响：电介质中存在陷阱，一些载流子会被陷阱捕获，只有部分载流子参与导电过程，因此在低场强下，材料的电导率较低，宏观上呈现出稳定的欧姆特性。当电压增大到某一数值，载流子的数量大于或等于陷阱的数量，所有陷阱都被填满，参与导电过程的载流子迅速增加，电流密度迅速增大。此时的电流密度[20]可以表示为

$$\lg J = 2\lg E + \lg\frac{9\varepsilon_0\varepsilon_r\mu}{8L} \tag{5}$$

式中：μ 为载流子迁移率；L 为材料厚度。非线性电导改性使复合材料内部的陷阱能级和密度下降，从而降低了非线性阈值场强。

1.1.5　隧道效应

填料和基体之间的界面存在势垒，会阻碍电子的无序热运动，在低场强下，即便少量电子可以越过势垒也会被陷阱所捕获，无法越过界面；在这种情况下，聚合物基体是电子运动的唯一路径，因而在宏观上表现出欧姆特性。电场提升会导致界面势垒倾斜，在场强达到阈值时，大量电子可以越过势垒，在填料和基体之间的界面进行传输，形成隧道电流[21]。导电填料和半导体填料使复合材料具有较低的界面势垒，可以促进电子的无序热运动，使复合材料的阈值场强显著降低。电流密度和场强的关系[22]为

$$J = AE^2\exp(-B/E) \tag{6}$$

式中：A 和 B 是主要与电极和介质之间功函数有关的常数。

1.1.6　跳跃电导理论

跳跃电导是在非晶半导体中，定域态中的电子通过热激活跳跃到相邻或更远格点上形成的电导。聚合物大多具有晶体区和非晶体区，非晶体区的电子克服晶粒之间的势垒进行传输，低场强下跳跃电导主要和热作用有关，电流密度和外加场强、温度的关系[23]可表示为

$$J = \frac{2ndve}{3}\exp(-\frac{U}{kT})\sinh(\frac{eEd}{2kT}) \tag{7}$$

式中：n 为载流子密度；d 为跳跃距离；v 为逃逸频率；U 为跳跃需要克服的活化能。导电填料或是半导体填料的引入，可以显著降低活化能，提高跳跃电导发生的几率，从而改善复合材料的非线性电导特性。

有学者认为，聚合物的导电过程并不是以单一的机制为主，而是各种导电机制的共同作用[24-25]。目前很难用统一的理论去解释不同温度、场强下，不同填料和基体制备的聚合物的非线性电导机理。

1.2　影响非线性电导特性的因素

实际应用中，聚合物基体的选择一般是固定的，因此填料的种类、含量以及温度是影响复合材料非线性电导特性的关键因素。

1.2.1　填料种类和含量的影响

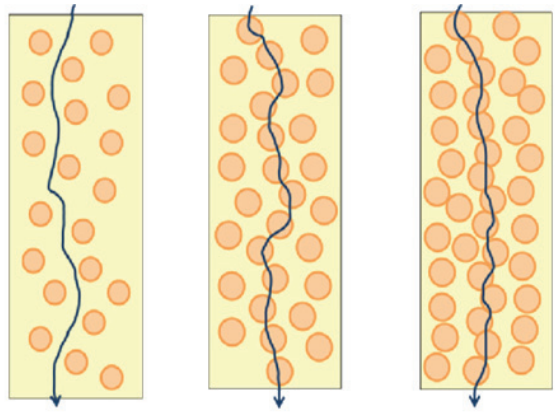
不同填料的电导特性存在差异，以最为常见的几种改性填料为例，ZnO 是各向异性陶瓷材料，其

非线性电导特性源于内部典型的无序晶界结构；而 SiC 的非线性电导特性源于颗粒表面氧化、场发射和局部加热理论等，这两种填料都可以有效提高复合材料的非线性系数[26]。而碳同素异形体具有很高的电导率，作为改性填料时能显著提高复合材料的电导率，但是对非线性系数的提高非常有限，且填料含量过高会导致复合材料丧失非线性电导特性[27]。同种填料的尺寸、形状、晶界等同样会影响复合材料的非线性电导特性，在本文后续章节会阐述如何通过调整以上参数来改善非线性电导复合材料的性能。

非线性电导复合材料中，电荷的传输路径分为以下 4 种：聚合物基体、聚合物−填料界面、填料颗粒内部、相邻填料颗粒。填料含量的增加改变了电荷的传输路径，伴随着复合材料几种导电机理的过渡过程，不同填料含量下的导电路径如图 1 所示。在较低的填料含量下，聚合物基体是电荷传输的主要路径，宏观上复合材料仍保持稳定的欧姆特性。随着填料含量的增加，填料颗粒之间的距离逐渐缩小，高场强下载流子可以越过聚合物基体和填料之间的势垒，相邻填料颗粒之间形成隧穿电流；填料颗粒内部电导、小部分聚合物基体、聚合物−填料界面构成的导电路径逐渐在电荷输运过程中占据主导地位，复合材料的电导率迅速提高，表现出明显的非线性电导特性。当改性填料含量继续增加至渗流阈值以上，填料颗粒之间相互接触形成完整的导电路径，填料内部电导和相邻填料颗粒间的电导成为电荷传输的主要路径[28-29]。尽管填料含量的增加伴随着导电机理的改变，但是宏观上表现为非线性阈值场强的降低和电导率的提高。

1.2.2 温度的影响

温度的升高，通常伴随着聚合物电导率的提高。由式(2)可以看出，温度升高促进了 Schottky 电极效应，从而提高了聚合物内部的载流子浓度。雷清泉院士指出：复杂聚合物中，低温下 SCLC 区受陷阱调制的电子电导占优势；在高温区则是离子电导占优势，会加强阴极电子发射，从而使 SCLC 区的电流增大[30]。此外，较高的温度有利于电子的无序热运动和热激发跳跃过程，提高了隧道效应和跳跃电导发生的概率，从而使载流子的迁移率显著提高[31]。也有学者提出，温度的升高使得载流子获得更多的能量，促进了载流子的脱陷过程，加速了载流子在复合材料内部的迁移，而电流密度对场强的依赖程度会随着温度的升高而降低，有可能导致复合材料非线性系数的下降[32]。



(a) 填料间距较大 (b) 填料间距较小 (c) 填料接触

图 1 不同填料含量下的导电路径

Fig.1 Conductive path under different filler contents

非线性电导复合材料的电导特性是材料自身特性和外部环境共同决定的，因此进行非线性电导改性方案设计时，要充分考虑以上因素对非线性阈值场强和非线性系数的影响。

2 改善非线性电导复合材料性能的措施

改性填料的添加本质上是在聚合物基体中引入了杂质，填料含量过低无法保证复合材料稳定的非线性电导特性；含量过高，复合电介质的界面缺陷会导致老化和劣化加快，以及击穿强度的大幅下降。此外，由于涉及高压绝缘设备、电子工业、和航天器构件等多个应用领域，非线性阈值场强和非线性系数需要适应于不同的应用场景，填料引入后复合材料的导热性能、机械强度能否长时间适应于工作环境也需考虑在内；只将零维球状填料引入到聚合物中远不能满足实际的应用需求。近年来，国内外学者致力于非线性电导材料综合性能改善和非线性参数调控的研究。何金良等总结了改善非线性电导复合材料性能和调控非线性电导复合材料参数的方法，主要包括：人工控制填料分布、高纵横比纳米填料的采用、聚合物基体的影响、填料内部晶界和填料形状对非线性参数的影响、添加第二种填料等[33]。调控填料自身的参数和引入第二种填料操作可行性更高，是当下主要用于改善非线性电导材料性能的方法。

2.1 单一填料的参数调控

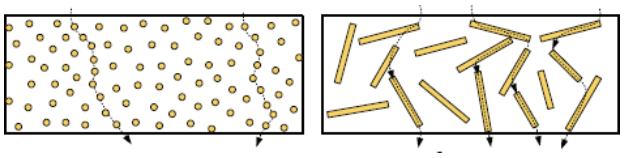
填料自身的维度、尺寸、形状、晶界等是影响复合材料非线性电导特性的关键性因素。通过对填

料自身参数的调控，可以有效降低填料的渗流阈值，调整复合材料的非线性电导特性。对于以零维氧化锌压敏微球作为填料的复合材料而言，影响复合材料非线性电导特性的因素主要有填料颗粒大小和形状、晶界个数等。何金良等学者研究发现，ZnO 压敏微球颗粒的大小决定了其接触电阻，填料的颗粒越大，接触电阻越小；不规则的颗粒之间存在角接触，对应的复合材料阈值场强和非线性系数均高于填料形状规则的情况[34]。对于形状规则的氧化锌压敏微球，每个 ZnO 晶粒的开关电压为 3 V，晶粒越小，晶界的个数越多，载流子越过晶界势垒所需要的能量越多，复合材料的非线性阈值场强会更高。影响晶粒尺寸的因素主要是烧结温度，因此可以通过改变氧化锌压敏微球的制备工艺来调控 ZnO/聚合物复合材料的非线性电导特性[35]。

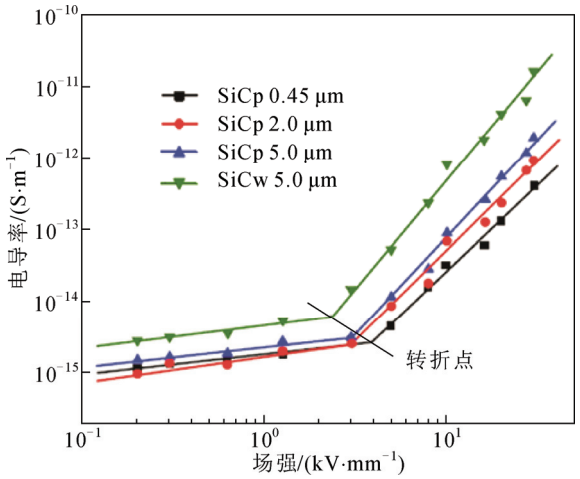
增大材料的纵横比，利用一维以上的填料，同样可以有效改善复合材料的非线性电导特性。Andriy V. Kyrylyuk 等学者的研究结果表明，碳纳米管复合材料比炭黑复合材料具有更高的电导率和更低的渗流阈值[36]。天津大学的杜伯学等学者发现，具有一维晶体形态的棒状碳化硅相较于碳化硅颗粒，可以更加有效地提升复合材料的非线性电导特性。掺杂不同尺寸和形状填料的硅橡胶电导特性如图 2 所示，高纵横比的棒状碳化硅相较于零维的球状颗粒，更易在硅橡胶基体内形成导电网络，且减少了碳化硅−硅橡胶界面的电荷输运[21]。

Karolina Gaska 等学者为了解决高填充含量下非线性电导复合材料力学性能劣化的问题，制备了石墨纳米片/低密度聚乙烯(low density polyethylene，LDPE)复合材料，在填料质量分数仅有 5% 时，复合材料就已经表现出明显的非线性电导特性，且力学性能几乎与改性前保持在同一水平[37]。聂京凯等利用银包覆的氧化锌晶须对硅橡胶材料进行改性。如图 3 所示，氧化锌晶须具有规整的三维空间结构，极易在聚合物基体中形成导电路径。包覆银降低了半导体粒子之间的能量势垒。在较低的填料含量下，就能使硅橡胶复合材料的压敏场强显著下降，非线性系数提高[38]。

具有较高纵横比的半导体纤维材料近年来也被作为非线性电导复合材料的改性填料，如钛酸钡纤维、钛酸铜钙纤维等。哈尔滨理工大学的迟庆国等学者利用静电纺丝技术制备了钛酸铜钙纳米纤维，用于改善硅橡胶的非线性电导特性[39]。如图 4 所示，钛酸铜钙纤维的大长径比结构使其随机分布在液体硅橡胶中时更易层叠形成导电通路。



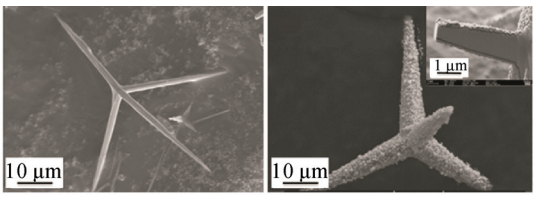
(a) α−SiCp　　(b) β−SiCw 导电路径示意图



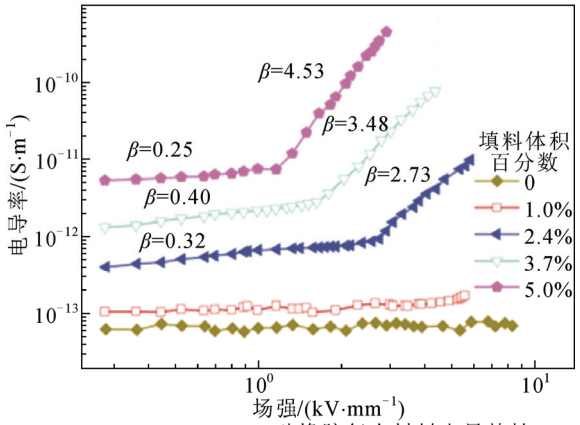
(c) 非线性电导特性

图 2　不同维度 SiC 填料对非线性特性的影响[21]

Fig.2　Influence of different dimension SiC fillers on nonlinear characteristics[21]



(a) T-ZnO 晶须　　(b) T-ZnO@Ag 晶须微观形貌

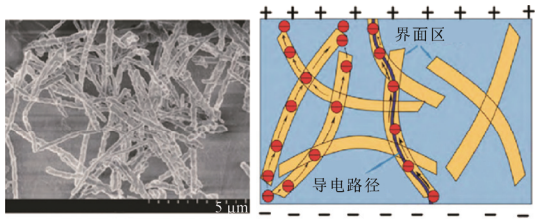


(c) T-ZnO@Ag/硅橡胶复合材料电导特性

β—非线性系数

图 3　晶须的微观形貌以及复合材料的电导特性[38]

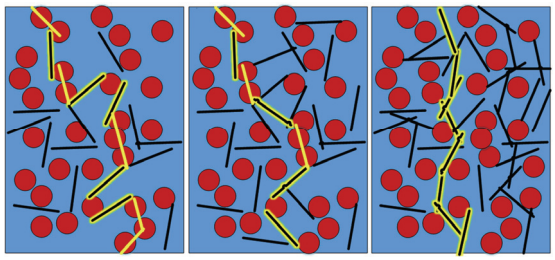
Fig.3　Microstructure of whiskers and electrical conductivity properties of composites[38]



(a) 微观形貌 (b) 导电路径

图 4 钛酸铜钙纤维的微观形貌和导电机制[39]

Fig.4 Microstructure and conductive mechanism of copper titanate calcium fiber[39]



(a) 少量碳纤维 (b) 适量碳纤维 (c) 过量碳纤维

图 5 ZnO/CF/SR 复合材料导电路径[27]

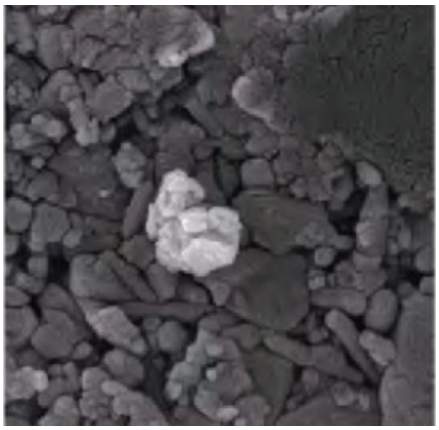
Fig.5 Conductive path of ZnO/CF/SR composite[27]

2.2 采用三元复合体系

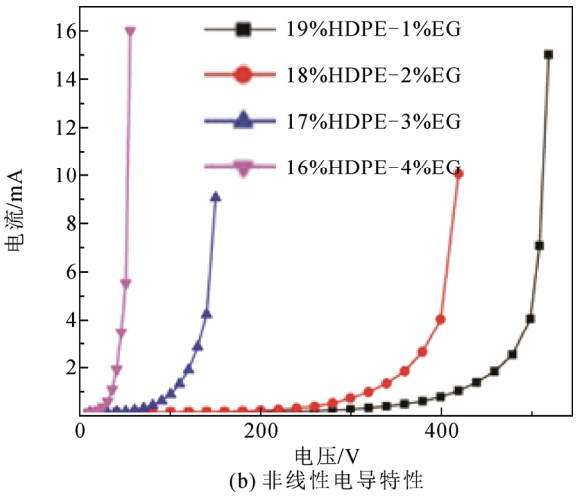
虽然通过调控填料自身的参数可以显著改善复合材料的性能，但是单一填料对聚合基体的改性效果是有限的。为了进一步改善复合材料的综合性能，需要引入第二种填料[40]。利用三元复合体系改善复合材料非线性电导特性的方案由日本东芝公司的 Hidehito Matsuzaki 等学者提出，通过在 ZnO/聚合物体系中加入小粒径导电或半导电颗粒，从而在较低填料含量的情况下形成更多的导电通道，得到性能优异的非线性电导复合材料[41-42]。随着材料领域的发展，第二种填料有了更多的选择。

碳同素异形体因其高电导性能经常被用于提高聚合物介质材料的电导率，一维以上的碳同素异形体作为第二种填料可以显著改善复合材料的非线性电导特性。何金良等学者在 ZnO/硅橡胶(silicon rubber，SR)复合材料中引入了碳纤维，使导电路径更易形成，避免了高填料含量引起的硅橡胶机械性能下降。如图 5 所示，在碳纤维含量适宜的情况下，一维碳纤维和零维的氧化锌颗粒在硅橡胶基体中形成了完整稳定的三维导电网络，在氧化锌含量较低时就能使复合材料具有良好的非线性电导特性；而过高的碳纤维含量则会导致碳纤维直接形成导电通路，大幅提升复合材料的电导率但会使其丧失非线性电导特性[27]。

伊朗的学者 Sara Mashkouri 利用二维片层状剥离性石墨(exfoliated graphite，EG)使得原有 ZnO/高密度聚乙烯(high density polyethylene，HDPE)复合体系的压敏场强可以在 40~400 kV/m 范围内进行调节，从而可以满足不同的应用需求。图 6(a)和图 6(b)所示分别为复合材料的微观形貌和不同 EG 含量下复合材料的非线性电导特性(ZnO 质量分数为 80%)。EG 和 ZnO 共同构成了导电路径，随着 EG 填料含量的增加，复合材料的非线性阈值场强从



(a) 微观形貌



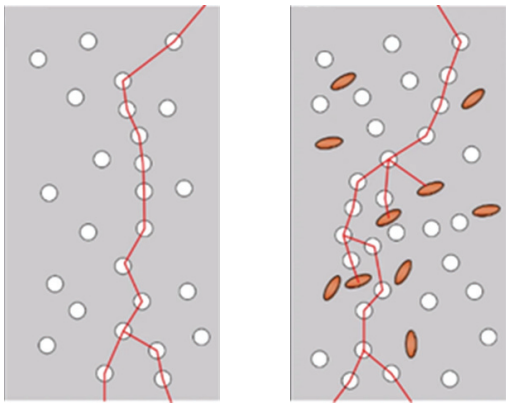
(b) 非线性电导特性

图 6 ZnO/EG/HDPE 的微观形貌与非线性电导特性[43]

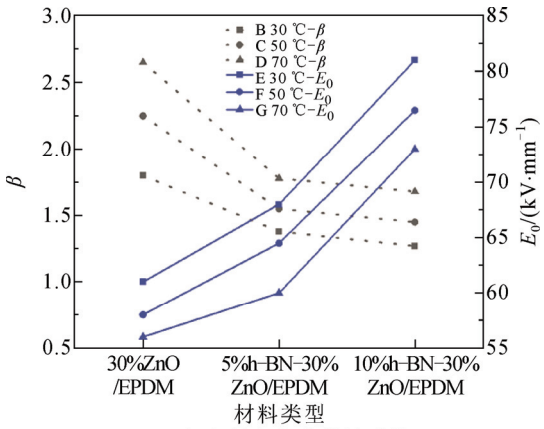
Fig.6 Microstructure and nonlinear *J-E* characteristics ZnO/EG/HDPE composites[43]

400 kV/m 下降至 40 kV/m[43]。

氮化硼作为第二种填料可以提升复合材料的击穿强度和导热性能，迟庆国等人将六方氮化硼(boron nitride，BN)引入了 ZnO/三元乙丙橡胶(ethylene propylene diene monomer，EPDM)复合材料，有效提升了材料的击穿强度。如图 7 所示，在不同的温度下，随着 BN 含量的增大，复合材料的



(a) 无 BN 的导电路径　(b) 引入 BN 后的导电路径



(c) 击穿强度和非线性系数

图 7　BN 对导电路径以及击穿强度、非线性系数的影响[44]

Fig.7　Influence of BN on conductive path, breakdown strength and nonlinear coefficient of ZnO/EPDM[44]

击穿强度显著提高，非线性系数略有下降[44]。后续的研究中，他们还发现 BN 同样可以显著改善钛酸铜钙/EPDM 复合体系的拉伸强度和断裂伸长率，并提高复合材料的击穿强度[45]。

具有特殊结构的改性填料可以使三元复合材料的性能更加优异。孙健等通过醇盐水解法，制备了以纳米碳化硅为核心、二氧化硅为壳层的核−壳结构碳化硅颗粒，并将其引入环氧树脂基体中。作为阻挡层的 SiO_2 自身具有良好的绝缘特性，限制了载流子迁移过程，且制备过程形成的氢键也提升了界面的相容性。与 SiC/EP 复合材料相比，SiC@SiO_2/EP 复合材料的阈值场强更高，非线性系数略微减小，但是击穿强度有明显的提升[46]。

国内外学者在施主掺杂、外加电场人工控制填料分布、同种填料的微纳米颗粒共同掺杂、通过表面改性改善填料分布等方向也进行了一些探索[47-48]。改性方法的多样性为航天器介质的深层充放电抑制提供了更多选择，但是各种新型非线性电导复合材料能否在空间环境下保持良好性能有待进一步探索。

3　非线性电导聚合物材料应用概述

非线性电导复合材料在高电压设备、电子器件、航空航天领域均具有广阔的应用前景，本章介绍了非线性电导聚合物材料的应用，以期待能够为非线性电导航天器介质的研究提供参考。

3.1　非线性电导航天器介质的应用

由于涉及航天机密问题，国外关于非线性电导航天器介质的应用研究成果很少对外公布。受限于无法充分满足的试验条件和高额的研发成本，国内利用非线性电导复合材料解决航天器介质内带电的研究还处于起步阶段，但是也实现了从简单材料制备向仿真计算、模拟空间试验研究的突破。

西安交通大学的郑晓泉课题组制备了具有非线性电导特性的 ZnO/环氧树脂(epoxy resin，EP)复合材料，用于航天器印刷电路板绝缘的内带电防护。空间电荷分布测试的结果表明，复合材料内部空间电荷的消散速度显著提升[49]。在航天器介质深层充放电的背景下，他们对聚四氟乙烯、聚酰亚胺等航天器介质材料也进行了相关的研究，但由于是在地面环境下对介质的各项性能进行研究，并不能满足改善空间环境下介质内带电的应用需求，其研究成果并未脱离普通的非线性电导复合材料研究范畴[50-51]。

国内学者也进行了相关的数值仿真研究来验证非线性电导复合材料对航天器介质深层充放电的改善效果。董磊等利用 Geant4 数值模拟和李忠华等人测得的 SiC/LDPE 复合材料电导率数据获得电流密度等参数，代入一维平板介质体充电模型进行了分析计算，得到了如图 8 所示复合材料内部充电场强分布。仿真结果表明，随着填料的增多，介质内部电场强度开始增大的深度和最大场强都逐渐降低[8,52]。由于在数值模拟中重点研究了电子辐射，而未考虑质子中子等其他高能粒子的影响，且所用的是简单的一维模型，因此其计算结果仍存在一定的局限性，但是对于非线性电导复合材料的应用研究具有启发性。

为了缓解航天器太阳帆板驱动机构(solar array drive mechanism，SADM)的深层充电风险，北京控制工程研究所的刘继奎等利用兰州空间技术物理研究所的电子加速器搭建了如图 9(a)所示的试验系统，开展了高能电子辐射诱发介质深层充放电效应

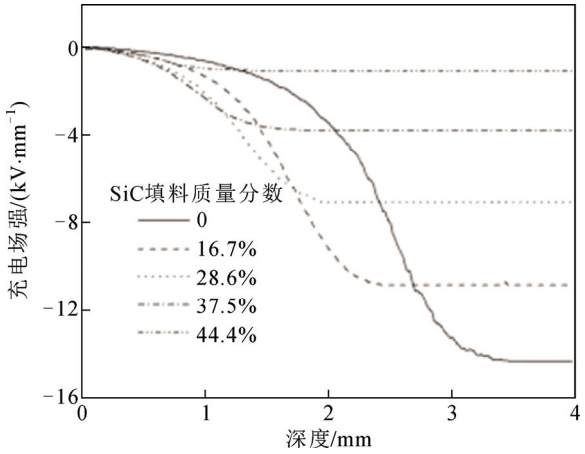


图 8 SiC 填料含量对充电电位的影响[52]

Fig.8 Effect of SiC filler content on potential[52]

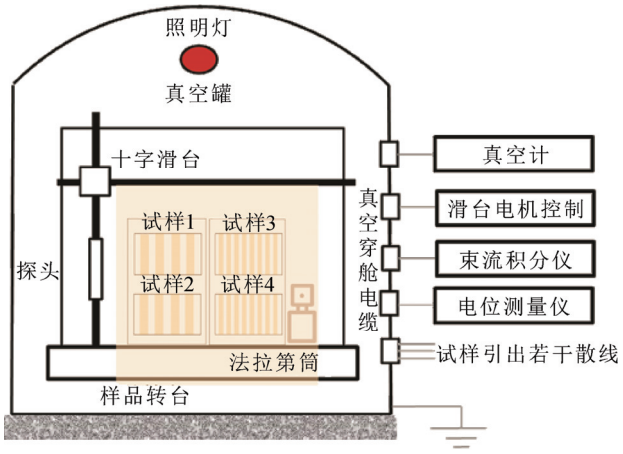
试验。SDAM 导电环片悬浮工况下的最高充电场强如图 9(b)所示，其中 YS20−A 为钛酸钾质量分数35%的聚酰亚胺样本，YS20−B 为氧化锌质量分数35%的聚酰亚胺样本。在接地、恒压、悬浮这 3 种模拟工况下，非线性电导聚酰亚胺材料并未发生静电放电。但是由于只考虑了 2 MeV 高能电子的辐射，能否保证在更恶劣的空间环境下使充电平衡时的最大场强仍保持在安全范围内有赖于进一步探究[53]。

从以上的研究成果来看，非线性电导复合材料作为航天器介质可以显著降低充电场强。但是非线性电导航天器介质的应用研究还处于仿真计算和实验室试验的初始阶段，仿真模型和试验条件较为简单，且研究对象主要是简单复合制备的材料，相关研究有待深入。

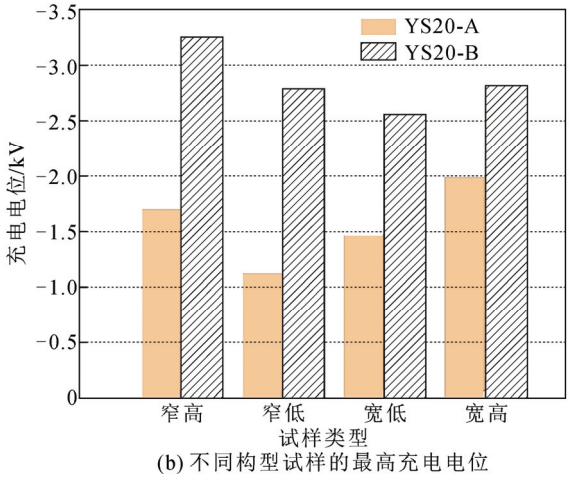
3.2 非线性电导聚合物在其他领域的应用

近年来，国内外学者对用于改善高压设备、电子器件电场分布的非线性电导复合材料进行了深入研究。司马文霞等制备了高填料含量的 ZnO/EP 复合绝缘膜，并通过仿真计算比较了不同填料含量的复合材料对直流气体绝缘输电线路中游离金属颗粒−气体−绝缘膜交界处电场分布的改善效果。仿真结果表明，填料含量越高，改善电场分布的效果越明显[54]。

清华大学的胡军等学者建立了 110 kV 交流预制橡胶应力锥仿真模型，来验证硅橡胶非线性电导复合材料对电缆终端电场分布改善的效果。如图 10 所示，受应力锥锥面几何形状影响，曲率半径较小处的局部场强较大。采用非线性电导复合材料作为应力锥绝缘部分，电缆终端的场强分布更加均匀[55]。



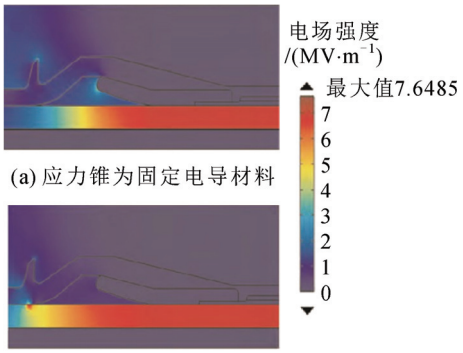
(a) 测试试验装置图



(b) 不同构型试样的最高充电电位

图 9 测试试验装置和试样最高充电电位[53]

Fig.9 Diagram of test experimental setup and maximal potential among samples[53]



(a) 应力锥为固定电导材料

(b) 应力锥为非线性电导材料

图 10 非线性电导材料改善电缆终端电场分布[55]

Fig.10 Improvement of electric field distribution by nonlinear conductivity materials[55]

ABB 公司的 L. Donzel 等通过有限元仿真，确定了用于改善铜金属化、陶瓷基板和凝胶或聚酰亚胺封装之间的三点交界处电场分布用材料的压敏场

强参数，并以此为依据制备了含有氧化锌压敏微球的聚酰亚胺非线性电导涂层，用以解决绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor，IGBT)铜金属化边缘处电场强度过高引起的静电放电问题[56]。如图 11 所示，非线性电导涂层 $\rho(E)$有效抑制了金属化边缘处由突起或其他缺陷引起的场峰。

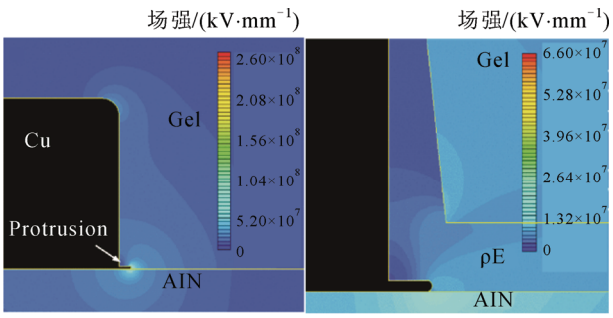
非线性电导复合材料在高电压设备和电子器件领域的应用研究较为成熟，仿真计算模型更加多样与复杂，可以更为准确地验证非线性电导复合材料均压效果。如何将非线性电导复合材料在高电压设备、电子器件领域的研究成果应用于航空航天领域，是非线性电导航天介质研究迫切需要解决的问题；满足高压设备、电子器件应用需求的非线性电导复合材料能否在空间环境下保持良好的性能，有待进一步探索。

4　研究展望

非线性电导复合材料应用于改善航天器介质深层充放电，关键在于实现非线性电导复合材料研究范围由地面环境下性能研究向空间环境下性能研究的延伸。考虑到航天器介质材料工作环境与普通绝缘材料的差异，非线性电导航天器介质的研究主要有以下几个发展方向。

1）空间环境下复合材料的导电机理。现有的理论模型只能定性解释部分试验结果，并未从微观层次建立起聚合物形态学和界面结构等因素与电荷输运机制的联系，对非线性电导材料的电荷输运缺乏统一的机理解释。此外，极端温度、空间辐射、原子氧、高真空、直流电压等协同作用下的聚合物电荷输运特性和机理并不明确。现有的研究多集中于温度和场强的影响，而并未考虑多因素耦合作用对非线性电导复合材料电导特性的影响，有赖于广大科研工作者加快机理研究。

2）材料性能研究与介质深层充放电仿真计算、地面模拟试验的协同发展。尽管新型非线性电导复合材料不断涌现，但是其性能研究多在地面环境下进行；而仿真和试验的研究对象大多是常规材料，或仅限于简单复合的非线性电导复合材料，两个领域的研究缺乏必要的关联性。当前迫切需要加快对新型非线性电导改性材料的充放电仿真和地面模拟试验研究，解决其在空间环境下的适应性问题以及本征电导率和辐射诱导电导率的参数匹配问题，并验证其对航天器介质深层充放电的抑制效果。



(a) 无非线性电导涂层　　(b) 有非线性电导涂层

Gel—硅胶；AlN—氮化铝；Cu—铜

图 11　有限元仿真计算的电场结果[56]

Fig.11　Electrical field calculated by finite element simulation[56]

3）介质深层充放电计算仿真模型和地面模拟试验条件的优化。当前的介质带电仿真主要关注一维或简单结构，缺少复杂部件的带电模型和仿真研究。此外，地面模拟试验应该体现多种辐射源和真空、冷黑等因素的综合作用，从而提高空间辐射环境模拟试验的真实性。解决以上问题，需要开展复杂三维带电模型的研究并推进航天器静电地面多源综合化模拟技术的发展，从而对非线性电导复合材料的静电防护效果提供准确有效的验证手段。

5　结论

1）非线性电导聚合物材料的电导特性受多种电荷输运机制的影响，但目前还没有统一的理论可以解释不同外部环境下、不同复合体系的非线性电导机理。

2）非线性电导聚合物材料的制备呈现出填料由零维向多维转变、二元复合向三元复合发展的趋势，新型非线性电导复合材料为改善航天器介质充放电的材料选型提供了更多的参考方案。

3）非线性电导聚合物材料在航天器介质充放电领域的应用探索，实现了从简单材料制备向数值仿真计算、地面模拟试验方向的突破，且仿真和试验的结果都表明非线性电导复合材料可以实现介质内部充电场强的主动控制。

最后基于对非线性电导聚合物材料研究现状的分析，从空间环境下的导电机理，材料研究与航天仿真计算、地面模拟试验的协同性，仿真模型和地面模拟试验优化等方向进行了展望。

参考文献　References

[1]　范亚杰，张希军，胡小锋，等. 航天器多层外表面充放电实验研究

[J]. 绝缘材料，2019，52(1)：42-46.
FAN Yajie, ZHANG Xijun, HU Xiaofeng, et al. Experimental study on charging and discharging of spacecraft multilayer external surfaces[J]. Insulatong Materials, 2019, 52(1): 42-46.
[2] 冯 娜，季启政，张絮洁，等. GEO 卫星多层隔热组件充放电特性仿真[J]. 航空学报，2021，42(9)：542-550.
FENG Na, JI Qizheng, ZHANG Xujie, et al. Simulation of internal charging characteristics for multi-layer thermal insulation in GEO satellites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 542-550.
[3] 刘尚合，胡小锋，原青云，等. 航天器充放电效应与防护研究进展[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2108-2118.
LIU Shanghe, HU Xiaofeng, YUAN Qingyun, et al. Research progress in charging-discharging effects and protection of spacecraft[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2108-2118.
[4] PAULMIER T, DIRASSEN B, REY R. Electrostatic behaviour of space used materials in regard of internal charging met on spacecrafts[J]. Journal of Electrostatics, 2018, 92: 66-74.
[5] ANDERSEN A, DENNISON J R, MOSER K. Perspectives on the distributions of ESD breakdowns for spacecraft charging applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(8): 2031-2035.
[6] 李盛涛，李国倡. 空间介质充放电研究现状及展望[J]. 科学通报，2017，62(10)：990-1003.
LI Shengtao, LI Guochang. Dielectric charging research status and prospect[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(10): 990-1003.
[7] 乌 江，白婧婧，沈 宾，等. 航天器抗内带电介质改性方法[J]. 中国空间科学技术，2010，30(2)：49-54.
WU Jiang, BAI Jingjing, SHEN Bin, et al. Formation mechanism of anti-deep-charged modification for space dielectric[J]. Chinese Space Science and Technology, 2010, 30(2): 49-54.
[8] 董 磊. 电子辐射致航天器充电问题的理论研究[D]. 济南：山东大学，2019.
DONG Lei. Theoretical research on spacecraft charging caused by electron radiation in space[D]. Jinan, China: Shandong University, 2019.
[9] VIRSBERG L. A new termination for underground distribution[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, PAS-86(9): 1129-1135.
[10] The Staff of NASA. Avoiding problems caused by spacecraft on-orbit internal charging effects[M]. Washington, USA: NASA, 1999.
[11] PURVIS C K, GARRETT H B, WHITTLESEY A C, et al. Design guidelines for assessing and controlling spacecraft charging effects NASA-TP2361[R]. Washington, USA: NASA, 1984.
[12] 何金良，谢竟成，胡 军. 改善不均匀电场的非线性复合材料研究进展[J]. 高电压技术，2014，40(3)：637-647.
HE Jinliang, XIE Jingcheng, HU Jun. Progress of nonlinear polymer composites for improving nonuniform electrical fields[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 637-647.
[13] 雷伟群，乌 江，彭 平，等. 改性聚酰亚胺复合材料的电导机理分析[J]. 北京航空航天大学学报，2015，41(6)：1049-1054.
LEI Weiqun, WU Jiang, PENG Ping, et al. Conduction mechanism analysis of modified polyimide composite[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(6): 1049-1054.
[14] BOGGS S A, ZHOU J Y. Dielectric property measurement of nonlinear grading materials[C] // 2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Victoria, Canada: IEEE, 2000: 764-767.
[15] CLARKE D R. Varistor ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1999, 82(3): 485-502.
[16] WANG Y, ZHOU X, LIN M, et al. Nonlinear conduction in aromatic polyurea thin films and its influence on dielectric applications over a broad temperature range[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 28-33.
[17] 李大伟. 聚乙烯的高场电导机制和空间电荷输运行为研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2021.
LI Dawei. Study on the high-field conductance mechanism and space charge transport of polyethylene[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2021.
[18] 刘生丽，冯辉霞，张建强，等. 逾渗理论的研究及应用进展[J]. 应用化工，2010，39(7)：1074-1078.
LIU Shengli, FENG Huixia, ZHANG Jianqiang, et al. The research of percolation theory and application[J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(7): 1074-1078.
[19] KIRKPATRICK S. Percolation and conduction[J]. Reviews of Modern Physics, 1973, 45(4): 574-588.
[20] 雷清泉，石林爽，田付强，等. 电晕老化前后 100HN 和 100CR 聚酰亚胺薄膜的电导电流特性实验研究[J]. 中国电机工程学报，2010，30 (13)：109-114.
LEI Qingquan, SHI Linshuang, TIAN Fuqiang, et al. Experimental research on conduction current characteristics of 100HN and 100CR polyimide film before and after corona aging[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 109-114.
[21] LI Z, DU B, YANG Z, et al. Effects of crystal morphology on space charge transportation and dissipation of SiC/silicone rubber composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2616-2625.
[22] VAN BEEK L K H, VAN PUL B I C F. Internal field emission in carbon black-loaded natural rubber vulcanizates[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 6(24): 651-655.
[23] BAMBERY K R, FLEMING R J, HOLBØLL J T. Space charge profiles in low density polyethylene samples containing a permittivity/conductivity gradient[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(20): 3071-3077.
[24] 钟力生，李盛涛，徐传骧，等. 工程电介质物理与介电现象[M]. 西安：西安交通大学出版社，2013：138-157.
ZHONG Lisheng, LI Shengtao, XU Chuanxiang, et al. Engineering dielectric physics and dielectric phenomena[M]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 2013: 138-157.
[25] 王 霞，王陈诚，孙晓彤，等. 高温高场强下 XLPE 及其纳米复合材料电导机制转变的实验研究[J]. 中国电机工程学报，2016，36(7)：2008-2017.
WANG Xia, WANG Chencheng, SUN Xiaotong, et al. Experimental study on the transference of conduction mechanisms of XLPE and its nano-composite under high temperature and high electrical stress[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 2008-2017.
[26] LIU C Y, ZHENG Y, ZHENG B, et al. Review of nonlinear conductivity theory research of modified composite materials[J]. IEEE Access, 2019, 7: 50536-50548.
[27] ZHAO X L, YANG X, LI Q, et al. Synergistic effect of ZnO microspherical varistors and carbon fibers on nonlinear conductivity and mechanical properties of the silicone rubber-based material[J]. Composites Science and Technology, 2017, 150: 187-193.
[28] LEBEDEV S M, GEFLE O S, STRIZHKOV A E. Novel polymeric composites with nonlinear current-voltage characteristic[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1), pp. 289-295
[29] YANG Z H, HU P H, WANG S J, et al. Effect of nano-fillers distribution on the nonlinear conductivity and space charge behavior in SiC/PDMS composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1735-1742.
[30] 雷清泉，李盛涛. 关于工程电介质中几个经常涉及的问题与思考[J]. 高电压技术，2015，41(8)：2473-2480.
LEI Qingquan, LI Shengtao. Several important issues and thinking about engineering dielectrics[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2473-2480.
[31] DU B X, YANG Z R, LI Z L, et al. Temperature-dependent nonlinear conductivity and carrier mobility of silicone rubber/SiC composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(3): 1080-1087.
[32] CHI Q G, YANG M, ZHANG C H, et al. Nonlinear electrical conductivity and thermal properties of AgNPs/BN/EPDM composites for cable accessory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1081-1088.
[33] 何金良，杨 霄，胡 军. 非线性均压材料的设计理论与参数调控[J]. 电工技术学报，2017，32(16)：44-60.
HE Jinliang, YANG Xiao, HU Jun. Progress of theory and parameter adjustment for nonlinear resistive field grading materials[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 44-60.
[34] YANG X, HU J, HE J L. Adjusting nonlinear characteristics of

ZnO-silicone rubber composites by controlling filler's shape and size[C]// 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD). Montpellier, France: IEEE, 2016: 313-317.
[35] YANG X, MENG P F, ZHAO X L, et al. How nonlinear V-I characteristics of single ZnO microvaristor influences the performance of its silicone rubber composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(2): 623-630.
[36] KYRYLYUK A V, VAN DER SCHOOT P. Continuum percolation of carbon nanotubes in polymeric and colloidal media[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(24): 8221-8226.
[37] GASKA K, XU X D, GUBANSKI S, et al. Electrical, mechanical, and thermal properties of LDPE graphene nanoplatelets composites produced by means of melt extrusion process[J]. Polymers, 2017, 9(1): 11.
[38] NIE J K, HOU D, WANG G K, et al. Preparation and nonlinear conductivity characteristics of silicone rubber filled with silver-coated tetrapod-shaped ZnO whiskers[J]. Journal of Electronic Materials, 2019, 48(4): 2517-2522.
[39] 迟庆国，李　振，张天栋，等. 钛酸铜钙纳米纤维/液体硅橡胶复合介质非线性电导性能[J]. 复合材料学报，2019，36(10)：2247-2258.
CHI Qingguo, LI Zhen, ZHANG Tiandong, et al. Nonlinear conductivity of copper calcium titanate nanofibers/liquid silicone rubber composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(10): 2247-2258.
[40] 姚　彤，边万聪，杨　颖. 微米氮化硼−纳米氧化铝复合环氧材料的导热与绝缘特性[J]. 高电压技术，2021，47(1)：251-259.
YAO Tong, BIAN Wancong, YANG Ying. Thermal conductivity and insulating property of epoxy composites with micro-BN and nano-Al_2O_3[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 251-259.
[41] MATSUZAKI H, NAKANO T, ANDO H. Effects of second particles on nonlinear resistance properties of microvaristor-filled composites[C]// 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Montreal, Canada: IEEE, 2012: 183-186.
[42] MARTENSSON E, NETTELBLED B, GAFVERT U, et al. Electrical properties of field grading materials with silicon carbide and carbon black[C]// Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. Vasteras, Sweden: IEEE, 1998: 548-552.
[43] MASHKOURI S, GHAFOURI M, ARSALANI N, et al. Mechanochemical green synthesis of exfoliated graphite at room temperature and investigation of its nonlinear properties based zinc oxide composite varistors[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28(6): 4839-4846.
[44] CHI Q G, HAN Y Y, ZHANG T D, et al. Study on nonlinear conductivity and breakdown characteristics of zinc oxide-hexagonal boron nitride/EPDM composites[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(23): 19678-19688.
[45] 迟庆国，杨　蒙，张天栋，等. 钛酸铜钙−氮化硼掺杂 EPDM 复合介质的电学和力学性能研究[J]. 高电压技术，2021，47(1)：223-230.
CHI Qingguo, YANG Meng, ZHNAG Tiandong, et al. Study on electrical and mechanical properties of calcium copper titanate boron nitride doped EPDM composites[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 223-230.
[46] 孙　健. 核−壳结构碳化硅/环氧复合绝缘材料介电性能与非线性电导特性的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2021.
SUN Jian. Study on dielectric properties and nonlinear conductivity characteristics of core-shell structured SiC/epoxy insulating composites[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2021.
[47] CHI Q G, JIANG L K, ZHANG T D, et al. Study on electrical properties of donor ZnO nanoparticles/EPDM composites[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021, 32(22): 26894-26904.
[48] 赵玉顺，闫　程，王学培，等. APTES 对环氧树脂/Al_2O_3 复合材料填料沉降和性能的影响[J]. 高电压技术，2022，48(3)：848-856.
ZHAO Yushun, YAN Cheng, WANG Xuepei, et al. Effect of APTES on sedimentation and properties of epoxy resin/Al_2O_3 composites fillers[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 848-856.
[49] LIU C Y, LI K N, ZHENG X Q, et al. Discussion on non-linear conductivity characteristics with space charge behavior of modified epoxy for spacecraft[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(5): 2724-2730.
[50] 白婧婧，乌　江，沈　宾，等. 聚合物介质材料的非线性电导改性工艺与机理分析[J]. 绝缘材料，2009，42(6)：71-74.
BAI Jingjing, WU Jiang, SHEN Bin, et al. The modification technology of nonlinear conductivity of polymer dielectric materials and analysis of mechanism[J]. Insulating Materials, 2009, 42(6): 71-74.
[51] 刘晨阳，郑晓泉，彭　平. 无机微米填料改性聚酰亚胺复合材料非线性电导特性[J]. 高电压技术，2015，41(12)：4137-4143.
LIU Chenyang, ZHENG Xiaoquan, PENG Ping. Nonlinear conductivity characteristics of modified polyimide composite materials with Inorganic Filler[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4137-4143.
[52] DONG L, TAN Z Y, TANG F L. Study of the effects of SiC filler on the internal charging of LDPE in space environment[J]. Advances in Space Research, 2015, 55(9): 2346-2351.
[53] 刘继奎，张可墨，柳　青，等. 航天器大功率传输介质深层充放电试验研究[J]. 高电压技术，2018，44(3)：864-869.
LIU Jikui, ZHANG Kemo, LIU Qing, et al. Internal charging and discharging tests of large power transfer dielectric on spacecraft[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 864-869.
[54] SHAO Q Q, SIMA W X, SUN P T, et al. A novel nonlinear conductive ZnO micro-varistor/epoxy resin composite film for metallic particle deactivation in DC GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 675-683.
[55] 胡　军，赵孝磊，杨　霄，等. 非线性电导材料应力锥改善电缆终端电场强度分布[J]. 高电压技术，2017，43(2)：398-404.
HU Jun, ZHAO Xiaolei, YANG Xiao, et al. Improving the electric field strength distribution of cable terminals by stress Cone of nonlinear conductivity material[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 398-404.
[56] DONZEL L, SCHUDERER J. Nonlinear resistive electric field control for power electronic modules[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 955-959.



张镱议
1986—，男，博士，特聘教授
主要从事电气设备故障诊断与绝缘材料等研究工作
E-mail: yiyizhang@gxu.edu.cn

ZHANG Yiyi
Ph.D., Professor



马海帮
1996—，男，硕士生
主要研究方向为非线性电导聚酰亚胺电介质薄膜的制备及性能研究
E-mail: 575574598@qq.com

MA Haibang



查俊伟(通信作者)
1982—，男，博士，教授，博导
主要从事储能电介质材料、绝缘材料、先进热管理材料、智能柔性电工材料等研究工作
E-mail: zhajw@ustb.edu.cn

ZHA Junwei
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-07-18　修回日期　2022-09-19　　编辑　曾文君