

于淑会团队设计具有等电子阱的纳米粒子作为填料 提高聚合物复合材料的电击穿强度

中国科学院深圳先进技术研究院先进电子材料研究中心于淑会与孙蓉团队在提高聚合物复合材料的击穿强度和静电能量密度研究取得进展。相应成果“Nanoparticles with rationally designed isoelectronic traps as fillers significantly enhance breakdown strength and electrostatic energy density of polymer composites (通过合理设计具有等电子阱的纳米粒子作为填料提高聚合物复合材料的击穿强度和静电能量密度)”于 2020 年 7 月 28 日发表在 *Composites Science and Technology* 上。

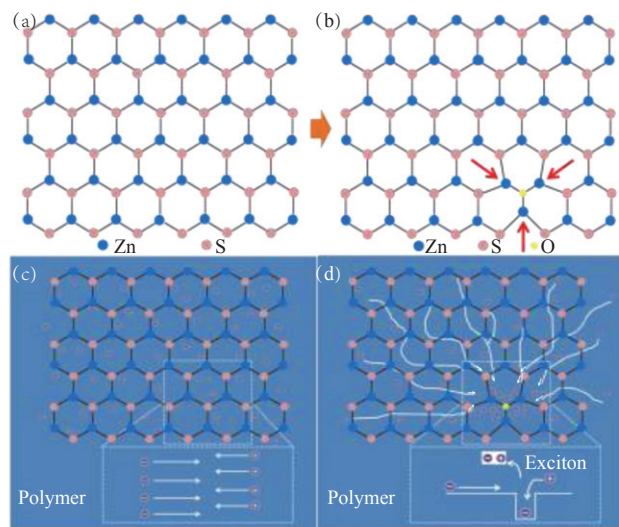
电气和电子系统小型化的发展进程，迫切需要研发具有高能量密度和高充放电效率的电介质聚合物纳米复合材料。提高复合材料能量密度的一个关键挑战是抑制复合材料中载流子的运动，这直接关系到材料的电击穿强度以及充放电效率。因此，通过对填料的理化性质进行合理的设计，使其具备束缚载流子运动的能力，将有效提高复合材料的放电能量密度及充放电效率，使得聚合物复合薄膜在电子电力系统小型化进程中发挥作用。

该研究利用固相反应法将 ZnS (硫化锌) 中的一部分 S 元素用 O 元素取代制备了 ZnS:O 纳米颗粒。由于 S 元素和 O 元素之间的电负性差异 ($\Delta EN=0.86$)，在 ZnS:O 纳米颗粒中形成等电子陷阱，可以在一定程度上束缚空间电荷，并抑制空间电荷的移动。以 ZnS:O 纳米颗粒为填料，采用二次分散法将其引入到聚偏氟乙烯 (PVDF) 基体中制备了 ZnS:O/PVDF 复合薄膜。

结果显示，ZnS:O/PVDF 复合材料的击穿强度 E_b 高达 6 000 kV/cm，能量密度可达 14.4 J/cm³，分别是纯 PVDF ($E_b \sim 3183$ kV/cm, 4.6 J/cm³) 的 2 倍和 3 倍以上，并且高于以 ZnS 为填料的 PVDF 基

复合材料。此外，等电子陷阱结构的引入也使得 ZnS:O/PVDF 复合材料的充放电效率高达 97%。

该研究以设计具有特定物理特性的纳米颗粒为出发点，首次从等电子陷阱的角度提升复合材料的电击穿强度，突破了常规填料结构设计的局限。从电击穿及损耗的产生机理入手，通过人为引入势阱来抑制载流子的运动，从根本上提升复合材料的击穿强度和放电能量密度，并降低介电损耗。这为复合介电材料的发展提供了新的研究思路，为电子、电力系统的集成化和小型化发展提供了更多的可能。



(a) ZnS 的 (111) 面; (b) ZnS:O 的 (111) 面; (c) ZnS/PVDF 复合薄膜中电子与空穴的运动; (d) ZnS:O 晶格中激子的形成过程

晶格中的空间电荷移动示意图^[1]

- [1] Yu JY, Ding SJ, Yu SH, et al. Nanoparticles with rationally designed isoelectronic traps as fillers significantly enhance breakdown strength and electrostatic energy density of polymer [J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 195: 108201.