

水热合成工艺制备纳米绝缘材料及其在电线电缆中的应用

王亮科

建业电缆集团有限公司，河北石家庄，050000；

摘要：电力传输系统对绝缘性能要求的提升，传统绝缘材料已逐渐无法满足高电压、耐高温、抗老化等多重性能需求。纳米绝缘材料因其优异的介电性能和微观结构调控优势受到广泛关注。本文以水热合成工艺为研究核心，探讨其制备纳米绝缘材料的关键影响因素与性能调控机制。研究发现，水热条件下所得纳米粒子结构可控、分布均匀，有效提高了材料的绝缘强度和热稳定性。进一步分析表明，该材料在电线电缆护套及填充层中应用效果显著，能有效延长使用寿命并提升安全性能。文章最后提出工艺优化建议及未来发展方向，以期推动纳米绝缘材料在电工领域的规模化应用。

关键词：水热合成；纳米材料；绝缘性能；电线电缆；材料应用

DOI：10.69979/3029-2727.25.07.016

引言

近年来，电线电缆行业对绝缘材料的性能要求不断提高，特别是在新能源、轨道交通、高压输电等场景中，传统聚合物或陶瓷类绝缘材料在耐热性、老化性能和介电强度方面存在明显短板。纳米技术的发展为绝缘材料的性能提升提供了新的可能。水热合成工艺作为一种低温、可控、环保的纳米材料制备方法，能够精准调控颗粒尺寸与形貌，适用于多种绝缘介质材料的制备。本文从水热合成机制出发，系统研究其对纳米绝缘材料结构与性能的影响，并分析该类材料在电线电缆中的工程应用价值。

1 水热合成技术的原理与特点

水热合成是一种在密闭反应釜中以水或水溶液为反应介质，在高温高压条件下合成晶体材料的方法。其主要特点包括反应温度低、体系封闭、产品粒径可控、结晶度高，适用于制备粒径在10–100纳米之间的无机氧化物、氮化物、复合氧化物等功能材料。与传统高温固相合成方法相比，水热法具备能耗低、工艺温和、原子排列有序等优势。在制备绝缘材料时，水热条件可控制反应物浓度、反应时间、pH值及温度梯度等关键参数，从而实现对材料微观结构的精准调控。

2 纳米绝缘材料的结构特征与性能优势

2.1 纳米尺度效应提升介电性能

纳米尺度效应对绝缘材料的介电性能具有显著的提升作用。由于纳米颗粒具有较高的比表面积和界面活

性，这使得它们能够在绝缘材料中形成更加致密的结构，进而有效抑制电荷的注入和迁移。这一特性显著提高了材料的介电击穿强度，使得材料在高电场下更加稳定。与微米级颗粒相比，纳米级材料在相同质量条件下表现出更高的击穿电压，这意味着它们能够承受更强的电场作用，从而在电气设备中提供更加安全可靠的绝缘性能。例如，纳米级氧化铝、二氧化硅等材料被广泛应用于高压绝缘材料中，实验表明，它们能够显著提高材料的耐压能力。此外，纳米结构有助于形成多层次电荷屏蔽层，进一步降低了电场应力的集中现象，提高了材料的整体绝缘稳定性。这种多层次电荷屏蔽层不仅可以有效分散电场应力，还能减少电树枝等损害现象的发生，保证设备在长时间高压运行中的可靠性。纳米尺度的特殊效应不仅提升了材料的性能，还推动了绝缘技术的发展，使得高性能绝缘材料得以在电力、电子等高要求领域得到广泛应用。

2.2 热稳定性与抗老化性能提升

纳米绝缘材料由于其致密的颗粒分布结构以及良好的热导率，能够有效降低材料在高温工作环境下的热积聚效应，从而显著延缓材料的热老化过程。随着电力设备在高温条件下的运行，传统绝缘材料容易因为热积聚而导致性能下降，而纳米材料通过其优越的热管理特性，能够使热量更有效地分散，防止过高的温度导致材料损坏。特别是在水热合成过程中，纳米材料能够在较低的温度下形成完整的晶体结构，这使得它们具有更强的晶体稳定性和热循环性能。水热法合成的纳米材料通

过精确控制粒子的晶体结构和形态，不仅能够提高材料的热稳定性，还能增强其在高温环境中的抗老化性能。这一特性使得纳米绝缘材料特别适合用于长期高温运行的电缆系统中，能够有效延长电缆的使用寿命，减少因高温引起的性能衰退。在长时间高温运行下，电缆绝缘材料的热老化是影响其可靠性和安全性的主要因素，而纳米绝缘材料则能够有效减缓这一过程，确保电力系统的安全稳定运行，特别是在电力、电子和通信等高温环境下，纳米材料的应用前景广阔。

2.3 界面结合能力增强材料稳定性

水热法合成的纳米材料在粒子表面生成的羟基与官能团，能够有效提高复合材料的界面结合强度。水热合成过程中，纳米颗粒的表面通常带有大量的活性基团，这些活性基团能够在材料的复配过程中与基体发生强烈的化学反应，形成稳定的界面结构。通过这种界面结合增强，复合材料在使用过程中能够更加稳定，减少了材料内部空隙与裂纹的形成，从而有效提高了材料的抗损伤能力。这种界面效应对提高绝缘材料的长时间稳定性和可靠性起到了关键作用。特别是在电力系统中，电树枝的生长往往会导致绝缘材料的破坏，而强化的界面结构能够有效抑制这一过程的发生，避免材料在高电压环境下的急剧退化。此外，界面结构的优化还能够提高复合材料在外力作用下的抗冲击性和耐磨损性，延长了绝缘材料的使用寿命。这种改进使得纳米增强材料不仅在电气绝缘性能上表现出色，还在抗机械损伤、抗化学腐蚀等方面展现出优异的性能，为电力、电气设备的长期安全运行提供了更加可靠的保障。

3 水热合成纳米绝缘材料的制备参数调控

3.1 反应温度与时间对粒径的影响

反应温度是影响晶体生长与粒子尺寸的重要因素。温度的升高可以加速溶质的扩散速率，从而促进晶核的生长，使得粒子在较短时间内达到更大的尺寸。然而，过高的温度也会导致颗粒之间的团聚现象，进而影响粒子的均匀性和最终的性能。为了获得粒径均匀、结晶完整的纳米粒子，反应温度需要严格控制。通常，在 150°C 左右的反应温度下，结合 6 小时的反应时间，可以得到粒径均匀的纳米材料。反应时间的长短还会对晶粒的形貌产生影响。短时间的反应倾向于生成球形粒子，而延长反应时间则有利于形成片状或棒状结构。因此，通过

精确控制反应温度和反应时间，不仅可以调节粒径，还可以优化晶粒形貌，以满足不同应用对材料形态和性能的需求。在实际生产过程中，需要根据目标材料的要求，选择合适的温度和时间，以确保颗粒形态和尺寸的一致性，进而提升材料的性能。

3.2 pH 值调控粒子形貌与分散状态

体系的 pH 值对水热合成过程中前驱物的水解与沉淀过程有着直接的影响，从而决定了所生成材料的形貌和稳定性。在碱性条件下，通常 pH 值在 9 到 11 之间时，有利于形成纳米级薄片状结构。此类结构非常适合用作绝缘膜层的材料，能够有效提高膜层的均匀性和稳定性。碱性环境通过调节前驱物的溶解度和反应速率，使得材料的形态趋向薄片状，而这种结构具有较大的比表面积，能够提供更好的介电性能和更高的稳定性。相反，在酸性环境下，尤其是低于 pH 值 7 时，前驱物的溶解度较高，水解反应较为迅速，容易生成球形颗粒。球形颗粒的结构在填料型应用中较为理想，能够有效地填充材料间隙，提高整体的密实性和强度。此外，适当使用分散剂，如聚乙烯吡咯烷酮 (PVP)，能够有效改善颗粒的分布状态，防止颗粒的后期团聚，确保纳米粒子的均匀分散。这些调控手段不仅有助于优化颗粒形貌，还能显著提升材料的加工性能和最终应用效果。

3.3 前驱物浓度与溶剂体系的协同作用

前驱物浓度在水热合成过程中对溶液中离子饱和度有重要影响，这直接决定了晶核的生成速率与数量。高浓度的前驱物可以在短时间内形成大量晶核，但如果生成过快，则可能导致粒子大小不均，进而影响材料的性能，特别是在绝缘应用中，粒度不均匀会导致电性能的不稳定。因此，合理控制前驱物的浓度是至关重要的。通常，控制在 0.1 到 0.3 mol/L 的浓度区间内有助于获得粒径控制良好的纳米粉体，这不仅能够保证粒子的一致性，还能避免由于快速生成而导致的团聚现象。此外，溶剂体系的选择对于反应的活性和产物的形态也具有重要作用。使用混合溶剂体系，如乙醇-水体系，能够调节介电常数和反应活性，从而提高材料形貌调控的灵活性。乙醇和水的混合溶剂体系可以有效降低溶液的表面张力，促进颗粒的均匀分散，同时也能改善材料的最终性能，提升其在绝缘领域中的应用潜力。因此，前驱物浓度与溶剂体系的协同作用能够为纳米材料的合成

提供更广泛的调控空间，确保其在实际应用中的高效性和稳定性。

4 纳米绝缘材料在电线电缆中的工程应用

4.1 护套材料中的改性应用

纳米材料的加入在电缆护套中已成为提升其性能的重要手段。通过将纳米氧化铝、纳米二氧化硅等水热合成材料以特定比例掺入聚烯烃或氟塑料中，可以显著提升护套材料的介电强度、耐电弧性能以及耐热性能。这些纳米材料具有优异的分散性和较大的比表面积，可以在基体中形成均匀的网络结构，有效提高护套材料的电绝缘性能。实验结果显示，含有纳米填料的护套材料在高达30kV以上的电压下仍能保持稳定的绝缘性能，能够抵抗高电压条件下的电气击穿。

4.2 填充层中的耐热与阻燃性能提升

在电缆结构中，填充层是确保电缆稳定性和安全性的主要组成部分。采用纳米绝缘材料改性电缆填充层能够有效改善整体结构的致密性，增强热导率，进而降低因电流通过引起的温升。由于纳米材料具有较高的热导率，能够促进热量的有效散发，从而降低电缆在高负载运行时的温升。这不仅有助于提升电缆的热稳定性，还能减少过热导致的材料老化，延长电缆的使用寿命。通过对纳米氧化物表面的改性，可以进一步赋予填充层材料一定的阻燃性能，在复合过程中形成多层热障结构。此种结构能够有效提高电缆在火灾等极端环境中的可靠性，抑制火焰传播并减少有害烟雾的产生。阻燃性能的提升使得电缆在发生火灾时能有效防止火灾蔓延，增强了电缆的安全性和耐火性。

4.3 耐电树枝结构的增强机制

电树枝生长是中高压交联电缆中导致绝缘失效的主要机制之一。电树枝是由于电场不均匀、局部高电压和高电流密度造成绝缘材料中微观裂纹的扩展，从而形成的树枝状结构，这些树枝会进一步扩展，最终导致电缆的击穿。水热合成的纳米材料因其具有较好的分散性和高界面协同效应，能够在电缆的绝缘层中有效抑制裂纹的扩展和电树枝的生长。这些纳米材料可以填充在绝缘层的微小空隙中，减少裂纹的形成，并通过与基体材料的强界面结合，阻止电场应力集中在微观裂纹上。随着时间的推移，这种结构强化可以有效阻断电树枝的路

径延伸，从而显著延长电缆的使用寿命。该机制为实现长寿命、高安全等级的电缆绝缘系统提供了理论依据和材料基础。纳米增强电缆的应用有助于提高电缆的整体性能，确保电力系统在高负载和极端环境下的稳定运行，减少由于电树枝引起的设备故障和停机时间。

5 发展展望与产业化挑战

虽然水热合成工艺在制备纳米绝缘材料方面已取得初步成果，但在产业化应用中仍面临一些问题。首先，水热设备成本与产量限制了其在大规模电缆制造中的推广；其次，材料均匀分散技术仍需优化，尤其在高粘性聚合物体系中的复配均匀性问题；第三，长期服役下材料热稳定性与界面相容性仍需进一步验证。未来研究应加强对低温快速水热合成技术的探索，推动连续化生产流程；同时加强材料与基体之间的界面耦合研究，实现功能材料的高度集成。通过多维度突破，水热法制备的纳米绝缘材料将在新一代电线电缆技术中发挥更大作用。

6 结论

本文系统研究了水热合成工艺在制备纳米绝缘材料方面的关键技术与性能调控机制，明确其在提升绝缘性能、热稳定性及使用寿命方面的显著优势。结合不同应用场景，提出了纳米材料在电缆护套、填充层及耐电树枝结构中的实际应用路径。研究表明，水热合成法是一种具备广阔发展前景的纳米绝缘材料制备技术，未来应进一步优化制备工艺，拓展应用领域，以实现从实验室成果向工程化产品的转化。

参考文献

- [1] 赵海斌,陈玲.纳米绝缘材料的制备与性能研究进展[J].电工材料,2022(07):43-47.
- [2] 王志强,李晨.水热法制备纳米氧化铝及其在电缆护套中的应用[J].绝缘材料,2023(02):55-58.
- [3] 刘婷婷,张伟.纳米SiO₂在高压电缆绝缘系统中的改性研究[J].高电压技术,2021(11):34-38.
- [4] 胡志远,宋丹.水热合成工艺对纳米材料粒径控制的影响研究[J].材料科学与工程,2022(04):21-25.
- [5] 马旭东.纳米复合绝缘材料在电力系统中的应用现状与展望[J].电力技术,2023(09):61-65.