

纳米二氧化硅增强硅橡胶复合材料的制备及其性能研究

冉帅,肖江滔*,张兆闯,夏建华,谢杰

(中国长江电力股份有限公司溪洛渡水力发电厂,云南昭通 657000)

摘要: 为了获得具有优异绝缘性能的硅橡胶,以硅烷偶联剂(KH570)改性的纳米SiO₂制备硅橡胶复合材料,研究其力学性能和绝缘性能。结果表明:随着纳米SiO₂含量的增加,硅橡胶复合材料的拉伸强度和邵A硬度均先增大后减小;同一频率下,介电常数(ϵ)先升高后减小;硅橡胶复合材料的体积电阻率(ρ_v)和击穿电压(BV)均先增大后减小。纳米SiO₂质量分数为15%时,硅橡胶复合材料的综合性能最佳,与纯硅橡胶相比,硅橡胶复合材料的拉伸强度和邵A硬度分别提高131.1%和83.8%; ρ_v 提高135.3%;在10⁰~10⁶ Hz频率范围内, ϵ 提高17.2%~24.1%;BV提高27.5%;60℃下老化30 d的BV提高44.3%;100℃下老化30 d的BV提高48.8%;140℃下老化30 d的BV提高46.2%。

关键词: 纳米SiO₂;硅橡胶;力学性能;绝缘性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0071-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.013

Study of Preparation and Properties of Nano-SiO₂ Reinforced Silicone Rubber Composites

RAN Shuai, XIAO Jiangtao*, ZHANG Zhaochuang, XIA Jianhua, XIE Jie

(Xiluodu Hydropower Plant, China Yangtze Power Co., Ltd., Zhaotong 657000, China)

Abstract: In order to obtain silicone rubber with excellent insulating properties, silicone rubber composites were prepared using silane coupling agent (KH570) modified nano-SiO₂, and their mechanical and insulating properties were investigated. The results showed that with the increase of nano-SiO₂ content, the tensile strength and Shore A hardness of the silicone rubber composites first increased and then decreased. At the same frequency, the dielectric constant (ϵ) first rose and then fell. The volume resistivity (ρ_v) and breakdown voltage (BV) of the silicone rubber composites also first increased and then decreased. When the mass fraction of nano-SiO₂ was 15%, the comprehensive properties of the silicone rubber composites were optimal. Compared with pure silicone rubber, the tensile strength and Shore A hardness of the silicone rubber composites increased by 131.1% and 83.8%, respectively. The ρ_v increased by 135.3%. Within the frequency range of 10⁰~10⁶ Hz, ϵ increased by 17.2%~24.1%. The BV increased by 27.5%. After aging for 30 d at 60 °C, the BV increased by 44.3%. After aging for 30 d at 100 °C, the BV increased by 48.8%. After aging for 30 d at 140 °C, the BV increased by 46.2%.

Keywords: Nano-SiO₂; Silicone rubber; Mechanical properties; Insulation properties

无机纳米复合橡胶材料不仅保留了橡胶的韧性、可加工性和优异的电绝缘性,还兼具纳米粒子的强度和结构稳定性^[1-3]。例如,向橡胶基体中添加碳纳米管^[4-5]、纳

米Mg(OH)₂^[6]、纳米SiO₂^[7-8]等均能增强橡胶的性能,或弥补纯橡胶性能的不足。纳米材料的增强作用赋予了橡胶复合材料优异的综合性能,拓展了橡胶材料的应用

收稿日期 Submitted date 2025-04-25; 修回日期 Revised date 2025-06-10; 录用日期 Accepted date 2025-08-26

基金项目: 中国长江电力股份有限公司科研项目(Z412302021)

*联系人, 13886701940@163.com

引用本文: 冉帅,肖江滔,张兆闯,等. 纳米二氧化硅增强硅橡胶复合材料的制备及其性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 71-75.

Citation: RAN S, XIAO J T, ZHANG Z C, et al. Study of preparation and properties of nano-SiO₂ reinforced silicone rubber composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 71-75.

领域^[9-10]。

硅橡胶复合材料具有良好的电绝缘性能以及优异的耐高低温性能、耐化学腐蚀性和耐候性^[11-13]。因此,硅橡胶被广泛应用于电子电器领域,尤其是作为电线电缆、高压绝缘子等绝缘材料,以保障输电线路的安全与稳定^[14-16]。然而,纯硅橡胶主链间的作用力极弱,导致其力学性能较差,未经补强的硅橡胶强度很低,使用价值较低^[17]。纳米SiO₂是一种研究较早的纳米材料,具有比表面积大、活性高、无毒、热稳定性高、化学性质稳定以及绝缘性能良好等特点,其内部结构基本呈三维网络状紧密结构,在橡胶硫化过程中对硅橡胶的增强效果显著,为纳米SiO₂增强硅橡胶复合材料的制备奠定基础^[18-19]。郑秋红等^[20]研究表面改性纳米SiO₂对硅橡胶力学性能的影响。结果表明,改性后的纳米SiO₂在硅橡胶中分散性良好,对硅橡胶的强度有显著增强效果。但是,该研究未涉及纳米SiO₂/硅橡胶复合材料的绝缘性能。

为了深入了解纳米SiO₂对硅橡胶绝缘性能的影响规律,本文采用硅烷偶联剂(KH570)对纳米SiO₂表面进行处理,得到改性纳米SiO₂,再将改性纳米SiO₂与硅橡胶制备硅橡胶复合材料,研究不同掺量改性纳米SiO₂对复合材料力学性能和介电性能的影响,旨在制备出综合性能优异的硅橡胶复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原料

甲基乙烯基硅橡胶(MVQ),110-2,广东翁江化学试剂有限公司;KH570,质量分数99%,山东云鑫新材料科技有限公司;纳米SiO₂,平均粒径为20~30 nm,杭州恒格纳米科技有限公司;硫化剂,工业级,济南科瑞达化工有限公司;羟基硅油,质量分数99%,黏度40 mm²/s,羟基含量4%,浙江溶力新材料股份有限公司;丙酮、乙酸,工业级,新乡市润泽科技有限公司。

1.2 仪器与设备

真空干燥箱,YZG-15,常州市万宝干燥设备有限公司;开炼机,SY-6215-A1,东莞市世研精密仪器有限公司;平板硫化机,3183,山东明投机械有限公司;傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),Nicolet Nexus 470,美国尼高仪器公司;数显拉力试验机,WDS-20,济南方圆试验仪器有限公司;邵氏硬度计,TY-810A,山东天研仪器有限公司;智能绝缘老化箱,401A,绍兴市容纳测控技术有限公司;固体绝缘材料击穿电压测试仪,HCDJC-100KV,北京华测试验仪器有限公司;介电常数及介质损耗测定仪,ZJD-C,北京智德创新仪器设备有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 KH570改性纳米SiO₂的制备

首先将丙酮和乙酸按照体积比1:1配制成溶剂,然后将8 g KH570加入500 mL溶剂中,常温搅拌1 h,得到改性溶液。将100 g纳米SiO₂加入改性溶液中,搅拌分散24 h,

然后离心过滤得到沉淀物。将沉淀物用去离子水冲洗,过滤循环5次,再将最终的沉淀物放入60 °C的真空干燥箱中干燥24 h,得到改性纳米SiO₂。

1.3.2 硅橡胶复合材料的制备

表1为硅橡胶复合材料的配方。按照表1所示比例,将硅橡胶在开炼机上破胶2 min。向开炼机中加入硅油、硫化剂和改性SiO₂,继续混炼30 min,再将混炼料薄通出片。再在25 t的平板硫化机上热压15 min,热压温度165 °C。将试样在真空干燥箱中干燥脱气24 h,干燥温度设置80 °C,然后取出,冷却至室温。最后将制备的复合材料裁切成试验要求的尺寸。

表1 硅橡胶复合材料的配方

Tab.1 Formula of silicone rubber composites

试样编号	硅橡胶/ phr	硅油/ phr	硫化剂/ phr	改性SiO ₂ / phr	w _{改性SiO₂} / %
1#	95	2	3	0	0
2#	95	2	3	5	5
3#	95	2	3	10	10
4#	95	2	3	15	15
5#	95	2	3	20	20

1.4 性能测试与表征

FTIR测试:将样品在105 °C烘箱中干燥4 h,采用KBr压片法测试SiO₂的红外光谱,测试范围4 000~400 cm⁻¹,扫描32次,分辨率4 cm⁻¹。

力学性能测试:拉伸强度测试参考GB/T 528—2009,拉伸速率500 mm/min,试样尺寸115 mm×6 mm×2 mm;硬度测试参考GB/T 531.1—2008,试样尺寸60 mm×60 mm×6 mm,测点离试样边缘距离不小于12 mm。

绝缘性能测试:环境条件为温度(23±2) °C,相对湿度(50±5)%。体积电阻率(ρ_v)测试参考GB/T 31838.2—2019,采用500 V直流电压,试样尺寸100 mm×100 mm×1 mm;介电常数(ε)测试参考GB/T 1693—2007,测试频率50 Hz,试样尺寸100 mm×100 mm×1 mm;击穿电压(BV)测试参考GB/T 1408.1—2016,以1 kV/s交流电均匀增压,直至试样被击穿,试样尺寸φ25 mm×1 mm。

2 结果与讨论

2.1 硅橡胶复合材料FTIR光谱分析

具有较高活性的纳米SiO₂在制备复合材料过程中易团聚,影响其在复合材料中的效果,而用硅烷偶联剂改性纳米SiO₂是提高纳米SiO₂与硅橡胶相容性最常用且有效的方法^[21-22]。图1为改性前后纳米SiO₂的FTIR谱图。从图1可以看出,在改性前纳米SiO₂的FTIR光谱中,3 438 cm⁻¹处归属结构水的O—H伸缩振动,1 641 cm⁻¹处归属表面吸附水的H—O—H弯曲伸缩振动,1 100 cm⁻¹处为Si—O—Si反对称伸缩振动峰,470 cm⁻¹和804 cm⁻¹处为

Si—O 的弯曲振动和对称伸缩振动峰。KH570 改性纳米 SiO₂ 后, 有新的吸收峰分别在 2 951 cm⁻¹ 和 1 742 cm⁻¹ 处出现, 2 951 cm⁻¹ 处对应 C—H 伸缩振动, 1 742 cm⁻¹ 处对应羰基(C=O)特征吸收峰, 说明 KH570 与纳米 SiO₂ 表面发生较强的化学键合作用, 说明 KH570 已成功接枝纳米 SiO₂ 颗粒表面^[22-24]。

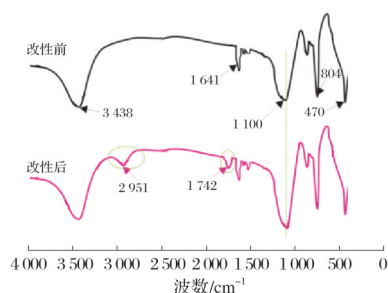


图1 改性前后纳米 SiO₂ 的 FTIR 谱图

Fig.1 FTIR spectra of nano-SiO₂ before and after modification

2.2 硅橡胶复合材料力学性能分析

图2为硅橡胶复合材料的力学性能。从图2可以看出, 随着纳米 SiO₂ 含量的增加, 硅橡胶复合材料的拉伸强度和邵A硬度均先增大后减小, 纳米 SiO₂ 质量分数为 15% 时, 拉伸强度和邵A硬度最大, 分别为 10.4 MPa 和 68, 比纯硅橡胶分别提高 131.1% 和 83.8%。这是因为硅橡胶主链较柔顺, 其分子链之间的相互作用力较薄弱, 纯硅橡胶力学性能较差, 而纳米 SiO₂ 的力学性能优于硅橡胶。纳米 SiO₂ 的加入使橡胶基体的网络密度和连通率提高。随着纳米 SiO₂ 含量的增加, 填料网络结构逐渐相互连通, 因此硅橡胶复合材料的力学性能显著提升。然而, 当纳米 SiO₂ 质量分数超过 15% 时, 硅橡胶复合材料的力学性能下降。这是因为继续增加纳米 SiO₂ 会使纳米 SiO₂ 颗粒出现集聚现象, 这反而降低了纳米 SiO₂ 的分散性, 导致硅橡胶基体网络结构的连续性下降, 导致硅橡胶复合材料力学性能降低^[25-27]。

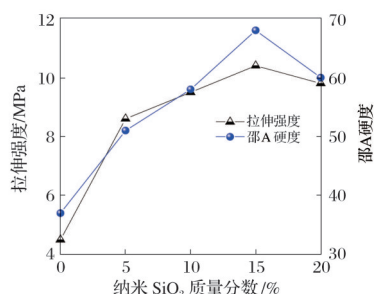


图2 硅橡胶复合材料的力学性能

Fig.2 Mechanical properties of silicone rubber composites

2.3 硅橡胶复合材料绝缘性能分析

2.3.1 ρ_v

图3为硅橡胶复合材料的 ρ_v 。从图3可以看出, 纯硅橡胶 ρ_v 为 $5.1 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 。随着纳米 SiO₂ 含量的增加, 硅橡胶复合材料 ρ_v 呈现先升高后降低的趋势, 纳米 SiO₂ 质量分

数为 15% 时, ρ_v 最大为 $1.2 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$, 比纯硅橡胶提高 135.3%, 相较于纯硅橡胶整整提高了 1 个数量级。这是因为: 一方面, 纳米 SiO₂ 粒子具有极高的比表面积和表面活性, 能够与硅橡胶分子链形成较强的物理或化学相互作用, 这种相互作用在材料内部构建起更为复杂的微观结构, 增加了电子在其中运动时的散射概率, 极大地阻碍了电子的定向迁移; 另一方面, 硅橡胶基体在制备过程中不可避免地存在一些微小的缺陷和空隙, 这些区域往往成为电子传导的优先路径, 而纳米 SiO₂ 粒子能够有效地填充硅橡胶基体中的微观缺陷和空隙, 使这些潜在的导电通道被阻断或削弱, 从而显著提高了 ρ_v 。

当纳米 SiO₂ 质量分数超过 15% 时, ρ_v 又开始降低。这是因为: 一方面, 从微观结构层面分析, 当纳米 SiO₂ 过量时, 纳米 SiO₂ 粒子间可能出现团聚, 团聚体的出现不仅破坏了材料原本相对均匀的微观结构, 还可能在团聚体内部或团聚体与基体界面间形成局部的导电通道, 为电子的迁移提供了便利路径; 另一方面, 纳米 SiO₂ 过量时, SiO₂ 粒子与基体之间的界面面积大幅增大, 界面极化现象加剧, 界面极化可能导致部分电荷在界面处积聚和迁移, 从而提高导电性能。这两方面原因都会降低 ρ_v 。

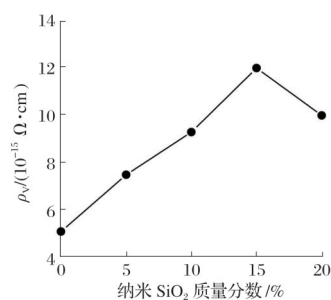


图3 硅橡胶复合材料的 ρ_v

Fig.3 ρ_v of silicone rubber composites

2.3.2 ϵ

测试 $10^0 \sim 10^6$ Hz 频率范围硅橡胶的 ϵ , 图4为硅橡胶复合材料的 ϵ 。从图4可以看出, 同一频率下, 加入纳米 SiO₂ 的硅橡胶复合材料 ϵ 均比纯硅橡胶的大。随着纳米 SiO₂ 含量的增加, ϵ 先升高后减小, 质量分数为 15% 时, 硅橡胶复合材料的 ϵ 最大。这是因为纳米 SiO₂ 会与硅橡胶基体形成界面区效应, 纳米 SiO₂ 质量分数在 15% 以内时, 纳米 SiO₂ 分散均匀, 随着 SiO₂ 掺量增加复合材料的界面区效应不断增强, 这种效应能够限制硅橡胶分子链运动, 降低载流子的数量和迁移率, 导致空间电荷注入量减小, 导致整个硅橡胶复合材料电导率下降, 进而使 ϵ 增大, 当 SiO₂ 质量分数为 15% 时达到最大, 因此 2#~5# 试样的 ϵ 均高于 1# 试样且不断增大。而当纳米 SiO₂ 质量分数为 20% 时, SiO₂ 颗粒可能出现颗粒团聚, 纳米 SiO₂ 与基体的界面效应被削弱, 同时 SiO₂ 颗粒也会参与电导行为, 纳米 SiO₂ 过多会导致的载流子浓度增加, 使复合材料的电导率升高, ϵ 降低, 因此 5# 试样的 ϵ 均低于 4#

试样^[28-29]。

在 $10^0\sim 10^6$ Hz频率范围内,纯硅橡胶的 ε 基本稳定;在 $10^0\sim 10^2$ Hz频率范围内,加入纳米 SiO_2 的硅橡胶复合材料的 ε 变化均较大;频率在 10^2 Hz以上时,加入纳米 SiO_2 的硅橡胶复合材料的 ε 基本稳定。主要是因为硅橡胶是非极性电介质,其介电性能在这个频率范围内不易发生变化。频率较低时,不同纳米 SiO_2 掺量的硅橡胶复合材料的 ε 均随着频率的增大而不断减小。其主要原因是:一方面,低频时,载流子可以在电极和复合材料的界面处充分汇聚,这就导致电极极化;另一方面,部分载流子会汇聚在复合材料基体与纳米 SiO_2 颗粒界面处,这个过程会发生界面极化^[28-29]。因此,复合材料低频 ε 减小的主要原因是电极极化和界面极化。频率较高时,随着频率的升高, ε 变化不大或是较稳定。其原因是高频下的载流子的运动速率增大,额外电极极化和界面极化很难发生,因此复合材料的 ε 保持稳定。纳米 SiO_2 质量分数为15%时,硅橡胶复合材料的介电常数 ε 最大,在 $10^0\sim 10^6$ Hz频率范围内, ε 提高17.2%~24.1%。

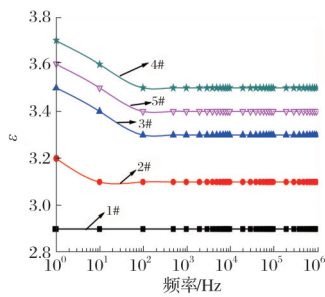


图4 硅橡胶复合材料的 ε

Fig.4 ε of silicone rubber composites

2.3.3 BV

图5为硅橡胶复合材料的BV。从图5a可以看出,60 °C热老化下,随着老化时间延长,硅橡胶复合材料的BV不断降低,老化30 d后,1#试样的BV从46.1 kV降低至37.5 kV,降低了18.7%;2#试样的BV从49.4 kV降低至40.6 kV,降低了17.8%;3#试样的BV从53.5 kV降低至43.7 kV,降低了18.3%;4#试样的BV从58.8 kV降低至54.1 kV,降低了8.0%;5#试样的BV从54.9 kV降低至49.6 kV,降低了9.7%。同一老化时间下,随着纳米 SiO_2 的

加入,硅橡胶复合材料的BV均高于纯硅橡胶。质量分数为15%时(4#试样),硅橡胶复合材料的BV最优,未老化时,4#试样的BV是1#试样的1.28倍;经过60 °C老化30 d后,4#试样的BV是1#试样的1.44倍。

从图5b可以看出,100 °C热老化下,随着老化时间的延长,硅橡胶复合材料BV不断降低,老化30 d后,1#试样的BV从46.1 kV降低至34.2 kV,降低了25.8%;2#试样的BV从49.4 kV降低至37.3 kV,降低了24.5%;3#试样的BV从53.5 kV降低至40.4 kV,降低了24.5%;4#试样的BV从58.8 kV降低至50.9 kV,降低了13.4%;5#试样的BV从54.9 kV降低至46.4 kV,降低了15.5%。同一老化时间下,随着纳米 SiO_2 的加入,硅橡胶复合材料的BV均高于纯硅橡胶。纳米 SiO_2 质量分数为15%时(4#试样),硅橡胶复合材料的BV最优,经过100 °C老化30 d后,4#试样的BV是1#试样的1.49倍。

从图5c可以看出,140 °C热老化下,随着老化时间延长,硅橡胶复合材料的BV不断降低,老化30 d后,1#试样的BV从46.1 kV降低至31.4 kV,降低了31.9%;2#试样的BV从49.4 kV降低至34.5 kV,降低了30.2%;3#试样的BV从53.5 kV降低至37.6 kV,降低了29.7%;4#试样的BV从58.8 kV降低至45.9 kV,降低了21.9%;5#试样的BV从54.9 kV降低至42.3 kV,降低了23.0%。从图5c还可发现,同一老化时间下,随着纳米 SiO_2 的加入,硅橡胶复合材料的BV均高于纯硅橡胶。纳米 SiO_2 质量分数为15%时(4#试样),硅橡胶复合材料的BV最优,经过140 °C老化30 d后,4#试样的BV是1#试样的1.46倍。

从图5a~图5c可以看出,随着老化温度的升高,同一老化时间下,硅橡胶复合材料的BV逐渐降低。这是因为随着温度升高,复合材料内部载流子获得更多的热动能,使载流子更容易越过势垒,能够参与电导行为的载流子的浓度和迁移率更大,使复合材料的电导率升高,BV降低^[30-31]。随着纳米 SiO_2 含量的增加,硅橡胶复合材料的BV先增大后降低。纳米 SiO_2 质量分数为15%时,硅橡胶复合材料的BV最优,与纯硅橡胶相比,BV提高27.5%,60 °C下老化30 d的BV提高44.3%,100 °C下老化30 d的BV提高48.8%,140 °C下老化30 d的BV提高46.2%。

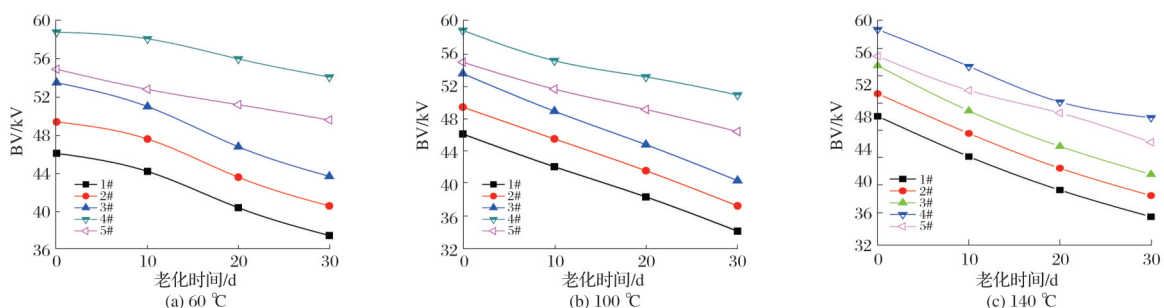


图5 硅橡胶复合材料的BV

Fig.5 BV of silicone rubber composites

3 结论

KH570改性纳米SiO₂后,2 951 cm⁻¹处和1 742 cm⁻¹处出现新吸收峰,说明KH570已成功接枝到纳米SiO₂颗粒表面。纳米SiO₂提高了硅橡胶复合材料的力学性能和绝缘性能。随着纳米SiO₂含量的增加,硅橡胶复合材料的拉伸强度和硬度均先增大后减小, ρ_v 先升高后降低;同一频率下,加入纳米SiO₂的硅橡胶复合材料 ϵ 均比纯硅橡胶大,随着纳米SiO₂含量的增加, ϵ 先升高后减小,BV先增大后降低。

纳米SiO₂质量分数为15%时,硅橡胶复合材料的力学性能和绝缘性能最佳,与纯硅橡胶相比,硅橡胶复合材料的拉伸强度和邵A硬度分别提高131.1%和83.8%, ρ_v 提高135.3%;在10⁰~10⁶ Hz频率范围内, ϵ 提高17.2%~24.1%,BV提高27.5%,60℃下老化30 d的BV提高44.3%,100℃下老化30 d的BV提高48.8%,140℃下老化30 d的BV提高46.2%。

参考文献

- [1] 柴辉,刘春生,马明,等.多功能纳米混合填料对丁苯橡胶复合材料性能的影响[J].橡胶工业,2025,72(7):523-532.
- [2] 马涛.天然橡胶纳米复合材料的研究进展[J].橡塑资源利用,2024(5):1-6.
- [3] 韩文彬,严刚,葛孚宇,等.添加碳纤维/碳纳米管复合填料的橡胶厚制品硫化过程中温度场和硫化程度模拟[J].橡胶工业,2025,72(5):323-332.
- [4] 何晓哲,王庆.碳纳米管对橡胶性能的影响[J].特种橡胶制品,2023,44(4):31-34.
- [5] 陈哲,高振良,董新贤,等.碳纳米管/甲基乙烯基硅橡胶复合材料的制备及吸波性能[J].合成橡胶工业,2025,48(3):196-202.
- [6] 申纯宇,李翠利,汤建伟,等.纳米氢氧化镁制备及其阻燃应用进展[J].化工进展,2024,43(9):4980-4995.
- [7] 沈瑶.纳米SiO₂/硅橡胶复合绝缘子陷阱对其击穿特性影响的分子模拟研究[D].银川:宁夏大学,2024.
- [8] 王大辉,王照琦,曹宏亮,等.纳米SiO₂包覆改性橡胶混凝土分形特征与力学性能研究[J].山西建筑,2024,50(22):9-13.
- [9] 刘兴杰,沈瑶,贾方瑞,等.纳米SiO₂/硅橡胶复合材料热裂解进程的分子模拟[J].高电压技术,2024,50(12):5397-5405.
- [10] 王林艳,周平德,张一铎,等.高导热氮化硼/天然橡胶纳米复合材料的制备与性能[J].化工进展,2025,44(6):3541-3549.
- [11] 徐祥.导热硅橡胶复合材料应用探究[J].上海轻工业,2024(3):183-185.
- [12] 邓馥郁.硅橡胶复合绝缘子的外绝缘污闪特性研究[J].四川职业技术学院学报,2022,32(4):153-158.
- [13] 付强,李浩明,彭磊,等.填充型导热绝缘硅橡胶复合材料的研究进展[J].绝缘材料,2024,57(9):1-14.
- [14] 莫莉,梁升锋,张勇,等.甲基乙烯基硅橡胶绝缘套管的制备及其在架空线绝缘防护中的应用[J].环境技术,2023,41(6):142-147.
- [15] 景巍巍,谢坤,李鸿泽,等.硅橡胶绝缘高压电缆附件的老化特性研究[J].高压电器,2023,59(11):201-210.
- [16] 刘培焱,杨皓翔,宋彦博,等.硅橡胶热老化对电连接器插合界面特性的影响[J].电机与控制学报,2025,29(4):23-34.
- [17] 艾江,康永.二氧化硅补强硅橡胶复合材料性能研究进展[J].广东橡胶,2016(8):15-25.
- [18] 辛颖,罗旭,霍天宇,等.纳米SiO₂和端羧基聚酯协同改性环氧树脂复合材料[J].兵器装备工程学报,2025,46(1):314-324.
- [19] 杨国清,蒋超璐,张中杨,等.冷热冲击下纳米粒子改性硅橡胶/环氧树脂绝缘修复涂料耐电特性[J].高电压技术,2024,50(5):2207-2216.
- [20] 郑秋红,刘丰,李小红,等.可分散性纳米二氧化硅补强硅橡胶的性能[J].高分子材料科学与工程,2007,23(3):139-142.
- [21] 王成江,范正阳,赵宁,等.硅烷偶联剂修饰下SiO₂-甲基乙烯基硅橡胶分子界面的黏结性[J].复合材料学报,2020,37(12):3079-3090.
- [22] 周晓慧,吴新国,周应学,等.改性二氧化硅对硅橡胶介电绝缘性能的影响[J].应用化工,2022,51(12):3561-3565.
- [23] 刘丰,郑秋红,李小红,等.可分散性纳米二氧化硅增强硅橡胶[J].复合材料学报,2006,23(6):57-63.
- [24] 钱豪峰,陶伟,何柳,等.原位合成纳米SiO₂/聚氨酯光固化疏水涂层及其性能[J].涂料工业,2024,54(11):36-41.
- [25] 韩晓莹.高压低温条件下的橡胶材料耐腐蚀性能及力学性能的分子动力学模拟[D].青岛:青岛科技大学,2023.
- [26] 孙传东,陈勇前,徐小博,等.气相法二氧化硅对硅橡胶力学性能的影响[J].有机硅材料,2022,36(5):12-16.
- [27] 刘丰,李小红.可反应性纳米二氧化硅补强硅橡胶性能的研究[J].广东化工,2020,47(24):7-8.
- [28] 赵瑞雪,门汝佳,徐晓晓,等.纳米SiO₂添加对乙丙橡胶相对介电常数和电导特性的影响[J].绝缘材料,2021,54(1):18-24.
- [29] 费华峰,喻研,张志杰.硅橡胶介电弹性体的研究进展[J].有机硅材料,2023,37(5):61-69.
- [30] 吕鸿,马佳炜,杨贤,等.热老化对220 kV硅橡胶电缆接头绝缘材料介电性能的影响[J].绝缘材料,2019(2):47-51.
- [31] 孙长海,尚京城,王明,等.新型纳米改性硅橡胶绝缘特性研究[J].当代化工,2018,47(7):1361-1366.