

电机用高导热绝缘材料研究进展

马红亮^{1,2}, 刘 嫵^{1,2}, 郑瑞娟^{1,2}, 樊洁心^{1,2}, 刘冠芳^{1,2*}

(1. 中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502;

2. 轨道交通牵引电机山西省重点实验室, 山西 永济 044502)

摘 要:高导热绝缘材料是实现电机高效散热的关键功能材料,对提升电机运行稳定性、延长使用寿命具有重要意义。本文简述了绝缘材料的导热改性机制,综述了近年来电机用高导热绝缘漆、云母带、薄膜及灌封胶等绝缘材料的研究进展,探讨了其在电机领域的应用现状,并对未来研究方向进行了展望。

关键词:高导热;绝缘材料;绝缘结构;电机

Research progress of high thermal conductive insulating materials for motor

MA Hongliang^{1,2}, LIU Yan^{1,2}, ZHENG Ruijuan^{1,2}, FAN Jiexin^{1,2}, LIU Guanfang^{1,2*}

(1. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji 044502, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Traction Motor for Rail Transit, Yongji 044502, China)

Abstract: High thermal conductive insulating materials are key functional materials for achieving efficient heat dissipation in motors, which is of great significance for improving the operational stability and prolonging the service life of motors. This article briefly described the thermal conductive modification mechanisms of insulating materials, reviewed recent research progress on high thermal conductive insulating varnish, mica tapes, films, and potting compounds used in motors, discussed their current application status in the field of motors, and further provided an outlook on future research direction.

Key words: high thermal conductive; insulating materials; insulation structure; motor

0 引言

随着电机向大容量、高电压、高功率密度、高集成化及轻量化方向发展,对电机绕组的绝缘与导热性能提出了更高要求,其绝缘状态与散热性能直接影响设备运行稳定性^[1-3]。电机运行过程中因各种损耗的存在,会不可避免地产生热量,而电机绝缘结构导热系数普遍低于 $0.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,与金属部件导热系数相差较大,严重制约电机内部热量的传导^[4]。绕组内部热量无法快速导出会致使电机运行温度升高,在长时高温运转下造成电机绝缘结构电气与力学性能下降、寿命缩短及松动等问题,严重影响电机运行可靠性^[5]。目前,传统的水冷、风冷散热技术难以有效导出电机绕组内部热量,而采用高耐热等级绝缘材料虽能提升绝缘结构耐热性,但会显著增加制造成本,且受材料本征性能限制,无法满足

电机日益严苛的设计需求^[6]。通过提升电机绝缘结构中关键绝缘材料的导热性能,可有效降低热阻、避免热量积聚,将绕组内部热量快速导出,从而有效降低电机温升^[4,7]。因此,研发高性能高导热绝缘材料已成为突破电机散热技术瓶颈、推动现代电机技术发展的重要方向。本文主要综述高导热的绝缘漆、云母带、绝缘薄膜及灌封胶等电机关键绝缘材料的研究进展。

1 绝缘材料导热改性机制

聚合物基绝缘材料属于饱和体系,其分子结构中不存在自由电子,从机理上认为其热量传递主要依赖晶格振动产生的声子^[8]。然而,绝缘材料存在分子量大、分子链无规则缠结、结晶度低、分子尺寸不均一等结构特征,导致声子在传输过程中产生大量的散射,阻碍热传导过程,因此绝缘材料导热系数偏低^[9-10]。目前,国内外提升绝缘材料导热系数主要有两种改性方式:本征型导热改性和填充型导热

基金项目:山西省科技重大专项计划项目(202401110101001)。

改性。

本征型导热改性是通过分子结构设计、合成工艺及加工过程调控,以获得具有高结晶度或取向度的规整结构,减少声子散射,构建声子传热通道,从而实现导热性能的定向优化^[11-13]。但是本征型导热改性技术面临工艺复杂、成本高、产量少及难度大的问题,目前仍处于实验研究阶段,距产业化应用尚有较大差距^[7,14]。

填充型导热改性是向聚合物基体中填充导热填料,通过调控填料类型、粒径、含量、形貌及其在基体中的分布,促使材料内部形成连续的导热通路,增强材料导热性能^[14-16]。填充型导热改性方式工艺简单、效果提升显著、可控性强、成本低且易于工业化生产,已成为提升绝缘材料导热性能的核心发展方向。

绝缘材料中导热填料含量过高时,易形成纳米或微米尺度的孔隙缺陷,致使材料力学性能与绝缘性能下降。通过对填料表面进行功能化修饰,可有效提升填料分散性与界面结合强度,在低填料含量下实现高导热性能的有效提升^[2,17]。此外,当基体与填料间介电常数相差较大时易引发电场畸变,导致绝缘材料击穿风险增加。因此,制备高导热绝缘材料时,需选择导热性能优异、介电常数低且与基体介电性能匹配的填料^[18]。目前,适用于提高绝缘材料导热性能的低介电导热填料主要有氧化铝(Al_2O_3)、氧化镁(MgO)、二氧化硅(SiO_2)、氧化锌(ZnO)、氮化硼(BN)、氮化铝(AlN)、氮化硅(Si_3N_4)及碳化硅(SiC)等,各填料具体参数如表1所示^[18-19]。

表1 常用填料的导热系数和介电常数		
Table 1 Thermal conductivity and dielectric constant of commonly used fillers		
填料	导热系数/(W/(m·K))	介电常数
Al_2O_3	38~42	9.3~11.5
MgO	36	9.7
无定型 SiO_2	1.5~1.6	3.9
结晶型 SiO_2	3	4.6
ZnO	60	8.2~11
BN	29~300	4.2~4.5
AlN	150~220	9
Si_3N_4	86~120	7~8
SiC	85	9.7

2 高导热绝缘材料研究现状及性能分析

当前,电机用绝缘漆、云母带、绝缘薄膜及灌封胶等关键绝缘材料的导热系数普遍偏低,约为0.1~0.25 W/(m·K),无法满足电机高效散热的发展需求。因此,研发兼具优异电绝缘性能与高导热能力的新型绝缘材料已成为推动新型高效电机发展的重要方向。

2.1 高导热绝缘漆

绝缘漆作为电机的核心绝缘材料,其导热性能直接影响电机的运行温升和可靠性。目前,引入无机导热填料是制备高导热绝缘漆的主要方式,但重点需解决填料分散不均匀及其与绝缘漆相容性差等问题,这是提升绝缘漆导热性能的关键^[20-21]。大量研究表明,使用硅烷偶联剂、钛酸酯偶联剂、等离子体及超支化聚合物等对填料表面进行功能化处理,可有效改善填料在绝缘漆中易团聚、沉降等问题,并在一定程度上提高绝缘漆的导热性能和力学性能。近年来,国内知名绝缘漆企业在高导热绝缘漆开发方面取得显著成果,并不断推动其产业化应用,如广州贝特、苏州太湖、浙江博菲、苏州巨峰及浙江荣泰等^[22-26]。表2为几款高导热绝缘漆产品的基本性能对比,可以看出国内高导热绝缘漆的导热系数均大于0.4 W/(m·K),固化挥发分较低,力学性能及电气强度满足电机用绝缘漆性能要求;但因填料含量过高、黏度普遍偏大,难以满足大电机真空压力浸渍工艺需求。

表2 高导热绝缘漆基本性能
Table 2 Basic properties of high thermal conductive insulating varnishes

性能指标	国内A	国内B	国内C	国内D
黏度(23℃)/(mPa·s)	1 450	1 500	1 550	850
凝胶时间/min	5	15	9	4
固化挥发分/%	1.1	0.6	0.55	0.8
粘结力/N	180	200	220	122
拉伸强度/MPa	33	37	35	31
电气强度/(kV/mm)	24	23	24	23
填料质量分数/%	43	48	40	35
导热系数/(W/(m·K))	0.53	0.43	0.42	0.52

2.2 高导热云母带

为有效降低电机温升并提升运行可靠性,近年来国内外厂家围绕云母带导热性能提升开展了大量研究。云母带由云母纸、胶黏剂及补强材料构

成,现有导热改性研究主要集中在云母纸改性^[27-28]、胶黏剂改性^[29-30]和补强材料改性^[31-32]三个方向。胶黏剂的导热系数仅为0.15~0.20 W/(m·K),显著低于其他组分,成为制约云母带整体导热性能的瓶颈^[33],因此突破云母带导热性能的核心在于提高胶黏剂的导热系数。在高导热云母带研制方面,三菱、西门子、ABB、东芝及丰罗等国际知名企业保持领先优势^[34],其开发的云母带导热系数已达0.50~0.65 W/(m·K);苏州巨峰、上海均达、苏州太湖、株洲时代、平安电工及哈尔滨理工大学等国内单位研制的云母带导热系数也达到了0.37~0.50 W/(m·K)。目前,国内外普遍采用掺杂导热填料的方式对云母带进行改性,其中BN因兼具优异的介电性能、化学稳定性和高导热性能,使得氮化硼基高导热云母带成为该领域研究热点^[35-36]。

表3对比了国内外高导热少胶云母带的基本性能。从表3可以看出,国外A云母带虽导热系数最高,但其较高的填料含量致使其电气强度和拉伸强度显著低于国产云母带;几款国产高导热云母带的材料组成、力学性能、电气性能与导热性能均满足GB/T 5019.13—2023《以云母为基的绝缘材料 第13部分:高导热性玻璃布补强少胶云母带》的要求。

表3 高导热少胶云母带基本性能

Table 3 Basic properties of high thermal conductive low-adhesive mica tape

性能指标	国外A	国内B	国内C	国内D
厚度/mm	0.18	0.14	0.18	0.15
胶含量/%	9	11	8	13
玻璃布含量/(g/m ²)	23	23	21	22
云母含量/(g/m ²)	160	155	162	165
填料含量/(g/m ²)	50	30	35	29
拉伸强度/(N/10 mm)	116	145	133	151
电气强度/(kV/mm)	10	15	15	15.7
导热系数/(W/(m·K))	0.63	0.37	0.38	0.50

2.3 高导热绝缘薄膜

聚酰亚胺(PI)薄膜具有良好的力学性能、耐热性、化学稳定性和电气绝缘性能,是电机绝缘结构中应用最为广泛的绝缘薄膜。传统PI薄膜的本征导热系数偏低,约为0.2 W/(m·K),无法满足电机高效散热需求^[37]。为此,国内外研究人员在PI薄膜导热改性方面开展了大量研究,其中引入无机导热填料是改善其导热性能最直接有效的方式^[37-40],美国杜邦和国内瑞华泰等厂家已推出成熟的高导热PI

薄膜产品,其导热系数均可达0.7 W/(m·K)。然而,通过填充无机导热填料提高PI薄膜导热性能的同时,往往伴随着力学性能和电气性能的显著下降^[41-42],难以满足电机绝缘材料对综合性能的严苛要求,距离实现大规模产业化应用尚有一定差距。因此,如何在保持PI薄膜综合性能优势的前提下,实现导热性能的有效提升,已成为该领域的研究重点^[42-43]。表4列举了几款不同PI薄膜的基本性能,可以看出国内外高导热PI薄膜的力学性能和电气性能均显著低于普通PI薄膜。

表4 几款不同PI薄膜基本性能

Table 4 Basic properties of high thermal conductive PI films

性能指标	国外A	国内B	国内C	普通产品
厚度/ μm	38	25	38	25
拉伸强度/MPa	90	80	80	240
断裂伸长率/%	30	20	25	100
电气强度/(kV/mm)	175	170	160	304
导热系数/(W/(m·K))	0.73	0.70	0.70	0.18

2.4 高导热灌封胶

采用高导热灌封胶对电机绕组端部进行整体灌封,是提升电机散热效率、降低运行温升的关键技术路径^[44-45]。通常要求此类灌封胶具备固化收缩率低、导热系数高、电气和力学性能优良、抗开裂及阻燃等特性,且在灌封温度下流动性良好。填充型导热改性是当前提升灌封胶导热系数的主流方式,填料含量较高时在灌封胶基体中易发生团聚,导致灌封胶黏度增大、导热系数下降以及力学性能变差等现象^[46]。为此,通常对导热填料进行表面改性,优化填料与基体的界面相容性,从而在提高灌封胶导热系数的同时改善体系流动性^[47]。

目前,国内外材料厂家已形成较为成熟的高导热灌封胶产品体系,国外有瓦克、陶氏、信越及汉高等,国内有苏州太湖、苏州巨峰、浙江荣泰和株洲时代等,表5是几款典型高导热灌封胶产品的基本性能对比。从表5可以看出,国内灌封胶在关键性能指标上已与国际产品形成对标:产品普遍具有低黏度($\leq 2\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$)和高导热系数($\geq 1.0\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),阻燃等级达到UL94 V-0级,且具有优良的力学性能和电气性能。

3 高导热绝缘材料在电机中的应用实践

随着电机技术快速发展,高导热绝缘材料已成为提升电机性能的核心要素。国外于20世纪初,将

表5 高导热灌封胶基本性能
Table 5 Basic properties of high thermal conductive encapsulant

性能指标	国外 A	国内 B	国内 C	国内 D
黏度(80℃)/(mPa·s)	1 800	1 630	1 570	1 878
可操作时间(80℃)/min	210	250	200	240
邵氏 D 硬度	85	81	83	88
拉伸强度/MPa	46	63	74	56
电气强度/(kV/mm)	24.8	21.7	23.5	24.5
介质损耗因数/%	0.39	0.63	0.55	0.45
线膨胀系数/($\times 10^{-6}$ K ⁻¹)	26	31.0	21.3	26.3
玻璃化转变温度/℃	95	90	97	95
导热系数/(W/(m·K))	1.18	1.10	1.12	1.15
UL94 阻燃等级	V-0	V-0	V-0	V-0

高导热绝缘技术应用于大型空冷、氢冷发电机^[48]。国内虽起步较晚,但近年在小型电机及高压电机绝缘结构方面取得突破,形成多例公开应用成果。

目前,高导热绝缘漆主要应用于小型低压电机的滴浸与沉浸绝缘处理。唐卫平等^[49]将导热系数为 0.43 W/(m·K)的绝缘漆应用于低压电机,使电机温升降低 7 K、散热效率提高 0.97%。崔院丽等^[50]以导热系数为 0.41 W/(m·K)的绝缘漆浸渍异步电机定子,使定子绕组温升下降 10 K。徐伟红等^[51]公开的高导热绝缘漆滴漆处理新能源电机定子绝缘技术,可显著提升绕组挂漆量和导热性能。

高导热云母带的研制与应用是当前行业研究热点。侯海波等^[52]仿真分析表明,导热系数为 0.44 W/(m·K)的云母带可使电机主绝缘温升降低 11 K,绝缘寿命延长一倍。王文等^[30]证实采用高导热少胶云母带可使绝缘结构导热系数翻倍,温升降低约 10 K,且不影响电气性能。景录如等^[23]采用导热系数为 0.42 W/(m·K)的绝缘漆和导热系数为 0.65 W/(m·K)的少胶云母带研制出高压电机减薄绝缘结构,其电老化寿命远高于普通绝缘结构,符合 6 kV 级高压电机技术标准。杜协和等^[53]通过环境试验验证,采用高导热少胶云母带的高压电机整浸绝缘结构兼具良好电气性能与环境耐受性,满足高压电机技术条件。余双敏等^[54]通过采用高导热云母带包扎线圈并优化层间绝缘装配结构,形成高导热整浸发电机定子绝缘系统,满足大型表冷发电机的散热温升需求。胡波等^[55]研究表明,将高导热云母带应用于大型空冷发电机定子绝缘结构中,可使定子绕组温升降低约 10 K,满足发电机长期运行要求。2024 年,

上海发电机厂采用苏州巨峰生产的高导热云母带研制了国内首台 GVPI 高导热型 80 MW 空冷发电机,使电机导热性能提升约 40%。

高导热灌封胶已在电机领域实现规模化应用,成为保障电机高效运行的核心绝缘材料。中车株洲电力机车研究有限公司采用导热系数为 1.9 W/(m·K)的灌封胶整体封装电机定子,使电机温升降低 10~18 K,并通过严苛的振动冲击试验,满足绝缘设计技术要求^[44]。中车永济电机有限公司采用导热系数为 1.18 W/(m·K)的灌封胶对低压电机定子整体灌封,相较直接真空压力浸渍(VPI)工艺,灌封后电机温升下降 20.7 K,且电气与防潮性能更优^[56]。

高导热绝缘材料的广泛应用,可有效提升电机绝缘结构的导热性能,降低电机的温升,使电机可靠稳定运行并延长使用寿命。因此,高导热绝缘材料的研制及应用是促使新型电机技术发展的关键,对现代电机技术研究尤为重要。

4 结束语

高导热绝缘材料已成为推动电机绝缘技术升级的重要研究方向,在电机领域展现出广阔的应用前景。近年来,在提高绝缘材料导热性能、扩展其在电机领域应用范围方面取得了重大进展,但仍面临诸多问题。结合电机技术发展需求,未来研究需重点聚焦 4 个方面:①在提升绝缘材料导热性能的同时,应兼顾其优异的电气绝缘性能、力学性能、工艺性能及长期稳定性;②电机中不同绝缘材料间可能存在相容性差的问题,需系统验证高导热绝缘材料与其他材料的匹配规律,明确其对电机绝缘系统整体性能的影响机制;③基于电机复杂运行工况(如高温、低温、振动等),合理优化高导热绝缘材料综合性能与应用方案;④通过配方设计与工艺创新,开发低成本、高稳定性的绿色制备技术,实现高导热绝缘材料在电机领域的产业化应用。

参考文献 References

[1] 王亚飞,刘静,方辉,等.新能源汽车用高导热环保型绝缘树脂的制备与性能[J].船电技术,2022,42(10):44-47.
WANG Yafei, LIU Jing, FANG Hui, et al. Preparation and properties of high thermal conductivity and environmental protection insulating resin for new energy vehicles[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2022, 42(10): 44-47.
[2] FENG Z P, HAO Y N, SONG Y H, et al. Thermally conductive high-voltage insulation composites with outstanding comprehen-

- sive properties through particle grading design[J]. *Journal of Applied Polymer Science*,2024,141(26):e55586.
- [3] 刘文雪,卞万康,虞鑫海.高导热环氧树脂复合材料的研究及其在电机上的应用[J]. *微特电机*,2022,50(1):51-56.
LIU Wenxue, BIAN Wankang, YU Xinhai. Study on high thermal conductivity epoxy resin composite and its application in motor [J]. *Small & Special Electrical Machines*,2022,50(1):51-56.
- [4] HUYNH T A, HSIEH M F. Improvement of traction motor performance for electric vehicles using conductors with insulation of high thermal conductivity considering cooling methods[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*,2020,57(2):1-5.
- [5] 李翠翠,郭胜智,宁方为,等.高压电机用高导热绝缘材料的应用[J]. *防爆电机*,2016,51(6):58-61.
LI Cuicui, GUO Shengzhi, NING Fangwei, et al. Research of the high thermal conductivity insulation materials used in high-voltage motors[J]. *Explosion-Proof Electric Machine*,2016,51(6):58-61.
- [6] 杨松,王健,宋桂霞,等.高导热少胶云母带在H级高压交流电机上的应用研究[J]. *绝缘材料*,2021,54(2):43-48.
YANG Song, WANG Jian, SONG Guixia, et al. Application of dry mica tape with high thermal conductivity in H-class high voltage AC motor[J]. *Insulating Materials*,2021,54(2):43-48.
- [7] 陈明华,孟宏远,李誉,等.聚合物基导热绝缘复合材料研究与应用进展[J]. *中国电机工程学报*,2023,43(17):6895-6914.
CHEN Minghua, MENG Hongyuan, LI Yu, et al. Research and application progress of polymer-based thermal-conductive electric-insulating composite materials[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023,43(17):6895-6914.
- [8] 潘红梅,董群锋,杨立峰,等.本征导热型绝缘液晶环氧树脂的研究进展[J]. *涂料工业*,2024,54(6):82-88.
PAN Hongmei, DONG Qunfeng, YANG Lifeng, et al. Research progress of intrinsic thermal conductive insulating liquid crystal epoxy resin[J]. *Paint & Coatings Industry*,2024,54(6):82-88.
- [9] LI R, YANG X, LI J, et al. Review on polymer composites with high thermal conductivity and low dielectric properties for electronic packaging[J]. *Materials Today Physics*,2022,22:100594.
- [10] 梁良.电场诱导下大电机主绝缘用高导热h-BN/EP复合材料性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2024.
LIANG Liang. Research on properties of high thermal conductivity h-BN/EP composites for main insulation of large generators by electric field induction[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology,2024.
- [11] 周文英,王芳,杨亚亨,等.本征导热聚合物研究:机理、结构与性能及应用[J]. *化学进展*,2023,35(7):1106-1122.
ZHOU Wenying, WANG Fang, YANG Yating, et al. Intrinsically thermal conductive polymers: heat conduction mechanism, structure & performances and applications[J]. *Progress in Chemistry*, 2023,35(7):1106-1122.
- [12] LI M H, GONG P, ZHANG Z B, et al. Electric-field-aligned liquid crystal polymer for doubling anisotropic thermal conductivity[J]. *Communications Materials*,2024,5(1):18.
- [13] WU Y F, WU K, XIAO F, et al. High thermal conductivity and excellent mechanical properties of liquid crystal co-polyester based on hydron bond[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023,140(25):e53951.
- [14] 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.
FU Qiang, LI Haoming, PENG Lei, et al. Research progress of filled thermal conductive and electrically insulating silicone rubber composites[J]. *Insulating Materials*,2024,57(9):1-14.
- [15] DO N B D, IMENES K, AASMUNDTVEIT K E, et al. Thermally conductive polymer composites with hexagonal boron nitride for medical device thermal management[C]//2023 24th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition. Cambridge, UK: IEEE, 2023:1-8.
- [16] HE Y F, KUANG F X, CHE Z X, et al. Achieving high out-of-plane thermal conductivity for boron nitride nano sheets/epoxy composite films by magnetic orientation[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*,2022,157:106933.
- [17] 易荣军,柯杰曦,孙通,等.低线膨胀系数导热环氧树脂的制备与性能评价[J]. *塑料工业*,2024,52(9):147-154.
YI Rongjun, KE Jiexi, SUN Tong, et al. Preparation and performance evaluations of thermal conductive epoxy resins with low linear expansion coefficient[J]. *China Plastics Industry*,2024,52(9):147-154.
- [18] 曹金梅,田付强,雷清泉.高导热聚合物复合绝缘材料研究进展[J]. *科学通报*,2022,67(7):640-654.
CAO Jinmei, TIAN Fuqiang, LEI Qingquan. Progress on the polymer composite insulating materials with high thermal conductivity[J]. *Chinese Science Bulletin*,2022,67(7):640-654.
- [19] GAO Y, LI J, LI Z L, et al. Polymer composites with high thermal conductivity for HVDC cable insulation: a review[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2023,30(6):2444-2459.
- [20] DARWISH M M F, ABDEL-GAWAD N M K, MANSOUR D E A, et al. Exploring the role of nanoparticles in improving polyester insulating varnishes for electrical machines[C]//2024 25th International Middle East Power System Conference. Cairo, Egypt: IEEE,2024:1-6.
- [21] WU X H, ZHANG X Y, YAN X X, et al. A review: from the whole process of making thermal conductive polymer, the effective method of improving thermal conductivity[J]. *Journal of Polymer Science*,2024,62(11):2410-2442.
- [22] 刘宗旺,唐建明,唐盛东,等.无卤阻燃导热绝缘漆的制备与研究[J]. *绝缘材料*,2017,50(8):77-80.
LIU Zongwang, TANG Jianming, TANG Shengdong, et al. Preparation and research of halogen-free flame retardant and thermal conductive insulating varnish[J]. *Insulating Materials*, 2017,50(8):77-80.
- [23] 景录如,吴斌,张春琪,等.纳米复合高导热绝缘材料及其绝缘结构研究[J]. *绝缘材料*,2018,51(2):23-29.
JING Luru, WU Bin, ZHANG Chunqi, et al. Study on nanocomposite insulating materials with high thermal conductivity and their insulation structures[J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(2): 23-29.

- [24] 狄宁宇, 张飞, 程微, 等. 高导热无溶剂绝缘漆的开发及性能研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(2): 33-36.
DI Ningyu, ZHANG Fei, CHENG Wei, et al. Development and performance study on solvent-free insulating varnish with high thermal conductivity[J]. Insulating Materials, 2021, 54(2): 33-36.
- [25] 周成, 徐伟红, 夏宇. 高压电机用高导热环氧VPI树脂及其制备方法和应用: CN114380958A[P]. 2022-04-22.
ZHOU Cheng, XU Weihong, XIA Yu. High thermal conductivity epoxy VPI resin for high voltage motors and its preparation method and application: CN114380958A[P]. 2022-04-22.
- [26] 葛凡, 郑芳, 冉涛, 等. 一种环保高导热浸渍漆及其制备方法: CN117757340A[P]. 2024-03-26.
GE Fan, ZHENG Fang, RAN Tao, et al. An environmentally friendly high thermal conductivity impregnating paint and its preparation method: CN117757340A[P]. 2024-03-26.
- [27] 王东月. 大型发电机定子线棒用高导热云母带的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
WANG Dongyue. Preparation and performance study of high thermal conductivity mica tape for large generator stator wire rod[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024.
- [28] RYOH T, YOSHITAKA T, FUKUSHIMA K, et al. Mica insulating tape for large generators with high thermal conductivity[C]// 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2018: 117-120.
- [29] LIANG L, FENG Y, YANG K L, et al. High thermal conductivity electrical insulation composite EP/h-BN obtained by DC electric field induction[J]. Polymer Composites, 2024, 45(1): 181-192.
- [30] 王文, 李翠翠, 陆春, 等. 高导热少胶云母带的制备及应用研究[J]. 绝缘材料, 2017, 50(8): 97-105.
WANG Wen, LI Cuicui, LU Chun, et al. Preparation and application of dry mica tape with high thermal conductivity[J]. Insulating Materials, 2017, 50(8): 97-105.
- [31] 余中军, 吴斌, 张春琪, 等. 一种无卤阻燃高导热云母带及其制备方法和应用: CN114479706A[P]. 2022-05-10.
YU Zhongjun, WU Bin, ZHANG Chunqi, et al. A halogen-free flame-retardant high thermal conductivity mica tape and its preparation method and application: CN114479706A[P]. 2022-05-10.
- [32] LI Y X, WANG Z, KONG M L, et al. Improved thermal conductivity and breakdown strength of PVDF-based composites by improving the dispersion of BN[J]. High Voltage, 2022, 7(3): 595-605.
- [33] 郑刚, 朱慧盈, 余双敏. 高导热少胶云母带的研究与探讨[J]. 绝缘材料, 2022, 55(9): 47-51.
ZHENG Gang, ZHU Huiying, YU Shuangmin. Study and discuss on high thermal conductive dry mica tape[J]. Insulating Materials, 2022, 55(9): 47-51.
- [34] GAO Hongjun, SHAN Zhiduo, WANG Xiaohang, et al. Research on the properties of high thermal conductivity stator bar for large generator[C]// 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications. Chongqing, China: IEEE, 2022: 1-4.
- [35] CHEN Q G, YANG K L, FENG Y, et al. Recent advances in thermal-conductive insulating polymer composites with various fillers[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 178: 107998.
- [36] 张豪峰, 石万里, 宋阳, 等. 氮化硼纳米片对环氧复合电介质的多目标性能协同提升研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(5): 30-41.
ZHANG Haofeng, SHI Wanli, SONG Yang, et al. Research on multi-performance synergistic enhancement of epoxy composite dielectrics by boron nitride nanosheets[J]. Insulating Materials, 2025, 58(5): 30-41.
- [37] 王艳艳, 张献, 肖超, 等. 聚酰亚胺基导热绝缘复合薄膜的研究进展[J]. 高分子通报, 2023, 36(8): 1015-1026.
WANG Yanyan, ZHANG Xian, XIAO Chao, et al. Research progress of polyimide based thermally conductive insulating composite Film[J]. Polymer Bulletin, 2023, 36(8): 1015-1026.
- [38] WANG Z F, WU Z J, WENG L, et al. A roadmap review of thermally conductive polymer composites: critical factors, progress, and prospects[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(36): 2301549.
- [39] 涂思帆, 杨丹妮, 梁旭昀, 等. 导热聚酰亚胺及其复合材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(11): 6043-6060.
TU Sifan, YANG Danni, LIANG Xuyun, et al. Research progress of thermally conductive polyimide and its composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(11): 6043-6060.
- [40] 韩莹, 袁天舒, 张宇轩, 等. 立方氮化硼填充聚酰亚胺制备导热复合薄膜[J]. 绝缘材料, 2025, 58(6): 25-34.
HAN Ying, YUAN Tianshu, ZHANG Yuxuan, et al. Thermal conductive polyimide composite films filled by cubic boron nitride[J]. Insulating Materials, 2025, 58(6): 25-34.
- [41] 高梦岩, 王畅鸥, 贾妍, 等. 导热聚酰亚胺绝缘薄膜材料的研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(6): 1-9.
GAO Mengyan, WANG Changou, JIA Yan, et al. Research progress in thermally conductive and insulating polyimide films[J]. Insulating Materials, 2021, 54(6): 1-9.
- [42] TAO K K, SUN G H, FENG C C, et al. Structural design and research progress of thermally conductive polyimide film-a review[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2023, 44(13): 2300060.
- [43] 刘杰, 杨军, 江乾, 等. h-BN/PI高导热复合材料制备及其性能表征[J]. 绝缘材料, 2025, 58(5): 49-54.
LIU Jie, YANG Jun, JIANG Qian, et al. Synthesis and performance characterization of h-BN/PI high thermal conductive composites[J]. Insulating Materials, 2025, 58(5): 49-54.
- [44] 王有川, 赵安然, 李强军, 等. 导热灌封胶在电机上的应用[J]. 绝缘材料, 2020, 53(8): 44-49.
WANG Youchuan, ZHAO Anran, LI Qiangjun, et al. Application of thermal conductive potting adhesive in motor[J]. Insulating Materials, 2020, 53(8): 44-49.
- [45] NATEGH S, BOGLIETTI A, BARBER D, et al. Thermal and manufacturing aspects of traction motors potting: a deep experimental evaluation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 1026-1035.

- [46] 井丰喜,刘亚丽,吴斌,等. 阻燃高导热环氧灌封胶的制备与性能研究[J]. 大电机技术,2022(5):76-82.
JING Fengxi, LIU Yali, WU Bin, et al. Preparation and properties of flame retardant epoxy potting adhesive with high thermal conductivity[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2022(5):76-82.
- [47] 赵登云. 高导热填料表面改性的研究及其应用[D]. 上海:东华大学,2021.
ZHAO Dengyun. Research and application of surface modification of high thermal conductivity filler[D]. Shanghai: Donghua University,2021.
- [48] 潘延明,付强. 大型发电机高导热绝缘材料的研究进展与应用前景[J]. 绝缘材料,2017,50(8):46-52.
PAN Yanming, FU Qiang. Research progress and application prospect of high thermal conductive insulation materials for large generators[J]. Insulating Materials,2017,50(8):46-52.
- [49] 唐卫平,赵晓洋. 高导热绝缘漆的研制及其在低压电机上的应用[J]. 绝缘材料,2014,47(4):37-40.
TANG Weiping, ZHAO Xiaoyang. Preparation of high thermal conductive insulating varnish and its application in low voltage motor[J]. Insulating Materials,2014,47(4):37-40.
- [50] 崔院丽,朱锦,袁伟文. 高导热绝缘漆对降低单相异步电机温升的影响研究[C]//2021年中国家用电器技术大会论文集,2021:1867-1874.
CUI Yuanli, ZHU Jin, YUAN Weiwen. Study on the influence of high thermal conductive varnish on the temperature rise of single-phase asynchronous motor[C]//Proceedings of China Home Appliance Technology Conference 2021,2021:1867-1874.
- [51] 徐伟红,周成,夏宇,等. 一种电机的绝缘处理方法及新能电动汽车电机的定子绕组:CN113991956A[P].2022-01-28.
XU Weihong, ZHOU Cheng, XIA Yu, et al. An insulation treatment method for a motor and a stator winding for a new energy electric vehicle motor:CN113991956A[P]. 2022-01-28.
- [52] 侯海波,唐文进,汤海涛,等. 高导热绝缘结构对永磁同步牵引电机温升影响的仿真分析[J]. 绝缘材料,2017,50(9):11-20.
HOU Haibo, TANG Wenjin, TANG Haitao, et al. Simulation analysis on effects of high thermal conductive insulation structure on temperature rise of permanent magnet synchronous traction motor[J]. Insulating Materials,2017,50(9):11-20.
- [53] 杜协和,张敬龙,王键,等. 高导热少胶整浸绝缘结构环境试验研究[J]. 防爆电机,2024,59(1):1-5.
DU Xiehe, ZHANG Jinglong, WANG Jian, et al. Study on environmental experiment of high thermal conductivity and low adhesive immersion insulating structures[J]. Explosion-Proof Electric Machine,2024,59(1):1-5.
- [54] 余双敏,张燕,柳成行,等. 一种高导热型整浸发电机定子绝缘系统的成型方法:CN119995288A[P].2025-05-13.
YU Shuangmin, ZHANG Yan, LIU Chenghang, et al. A molding method for a high thermal conductivity integral immersed generator stator insulation system: CN119995288A[P]. 2025-05-13.
- [55] 胡波,梁智明,漆临生,等. 大型空冷发电机定子线棒高导热绝缘技术研究[J]. 东方电气评论,2018,32(3):63-69.
HU Bo, LIANG Zhiming, QI Linsheng. The study on insulation technology of high heat conductivity of stator bar for large air-cooled generator[J]. Dongfang Electric Review, 2018, 32(3): 63-69.
- [56] 史开华,刘冠芳,牛玉龙,等. 高导热耐高温环氧灌封树脂在低压电机上的应用研究[J]. 绝缘材料,2021,54(2):27-32.
SHI Kaihua, LIU Guanfang, NIU Yulong, et al. Application of high thermal conductive and high temperature resistant epoxy encapsulating resin in low voltage motor[J]. Insulating Materials, 2021,54(2):27-32.

收稿日期:2025-06-03;修回日期:2025-07-09。

作者简介:

马红亮(1993-),男(汉族),陕西宝鸡人,工程师,主要从事电机绝缘技术的研究;

通信作者:刘冠芳(1983-),女(汉族),河南灵宝人,正高级工程师,主要从事电机绝缘系统的设计技术的研究。