

## ANF/mica 复合绝缘纸的制备及性能分析

赵莉华<sup>1</sup>, 滕富莉<sup>1</sup>, 魏佳<sup>1</sup>, 高萌<sup>2</sup>,  
卞超<sup>1</sup>, 卓然<sup>2</sup>, 卿湫惋喻<sup>1</sup>, 任俊文<sup>1</sup>

(1. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065;  
2. 南方电网公司电力科学研究院有限公司, 广东 广州 510623)

**摘要:**以芳纶纳米纤维(ANF)为基体,天然云母(mica)为填料,通过真空辅助抽滤和热压技术制备了 ANF/mica 复合绝缘纸,并系统研究了复合绝缘纸的微观形貌、拉伸特性、电绝缘性能以及耐高温性能。结果表明:mica 与 ANF 在真空抽滤过程中有序叠加,mica 碎片有效填补了纸张中的空隙,形成致密的“砖泥结构”,显著提高了复合绝缘纸的电气强度和绝缘性能。此外,纯 ANF 绝缘纸和 ANF/mica-10 复合绝缘纸的玻璃化转变温度均高于 300°C,展现出优异的热稳定性。虽然 mica 的加入稍微降低了纯 ANF 绝缘纸的拉伸性能,但其绝缘强度和拉伸性能仍明显优于传统云母纸。

**关键词:**芳纶纳米纤维;天然云母;复合绝缘纸;拉伸特性;电气强度

## Preparation and performance analysis of ANF/mica composite insulating paper

ZHAO Lihua<sup>1</sup>, TENG Fuli<sup>1</sup>, WEI Jia<sup>1</sup>, GAO Meng<sup>2</sup>,  
BIAN Chao<sup>1</sup>, ZHUO Ran<sup>2</sup>, QING Qiuwanyu<sup>1</sup>, REN Junwen<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. Electric Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510623, China)

**Abstract:** An ANF/mica composite insulating paper was prepared by vacuum assisted filtration and hot pressing technology taking aramid nanofiber (ANF) as matrix and natural mica (mica) as filler. The microscopic morphology, tensile strength, electrical insulation properties, and temperature resistance of the composite insulating paper were studied systematically. The results show that the mica and ANF are superimposed in order during vacuum filtration process, and the mica fragments fill the gaps in paper effectively, creating a dense "brick-and-mortar structure", which significantly enhances the electric strength and insulating properties of the composite insulating paper. Furthermore, the glass transition temperatures of pure ANF insulating paper and ANF/mica-10 composite insulating paper are higher than 300°C, exhibiting excellent thermal stability. Although the addition of mica slightly reduces the tensile properties of pure ANF insulating paper, its insulation strength and tensile performance remain superior to traditional mica paper.

**Key words:** aramid nanofibers; natural mica; composite insulating paper; tensile properties; electric strength

### 0 引言

近些年,随着新能源汽车对电机系统性能要求的不断提高,电机系统朝着高速高效、轻量化和高可靠性方向发展,相应地对绝缘材料的性能要求也不断提高<sup>[1-3]</sup>。在此背景下,为满足安全性、稳定性和耐用性的需求,新型绝缘材料应运而生,成为推动电机技术进步的关键。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52107020, 52377028);四川省重点研发项目(2023YFG0236);电力设备电气绝缘国家重点实验室开放基金项目(EIPE23210)。

云母作为一种无机耐高温绝缘材料,具有优异的电性能、耐热性能、耐化学性能、耐电晕性和低成本等特点,在绝缘系统中被广泛应用<sup>[4-5]</sup>。纯云母纸虽具有优异的电性能,但云母片(mica)之间范德华力较弱且界面作用差,制成的纯云母纸力学特性差,纸张非常脆且易碎<sup>[6]</sup>。芳纶纤维(AF)具有优异的拉伸强度、模量和耐高温性能<sup>[7-8]</sup>,常被用作补强材料来提高云母纸的韧性和拉伸强度,芳纶云母纸就是基于云母纸和芳纶绝缘纸的发展趋势而出现的新型复合材料,已经应用在建材、航空、国防等多个领域<sup>[9-11]</sup>。现有研究大多着眼于利用 AF 作为力学

增韧剂来改善芳纶云母纸的力学性能, H MITSUI 等<sup>[12]</sup>研究发现加入少量 AF 可以提高纸张的剪切强度、透气性及热稳定性, 但降低了纸张的电气强度。张翼等<sup>[13]</sup>研究发现天然纤维与 mica 复合可以改善纸张的拉伸强度, 但纸张的电气性能降低。王腊梅等<sup>[14]</sup>研究发现芳纶短切纤维和芳纶浆粕的加入改善了芳纶云母纸的力学性能、耐高温性等, 但在一定程度上降低了芳纶云母纸的绝缘性能。从上述研究成果可以看出, 通过添加 AF 可以增强芳纶云母纸的韧性和强度, 但芳纶云母纸整体的韧性和强度仍较低, 且随着纤维的加入, 芳纶云母纸的电气强度遭到破坏, 无法充分发挥芳纶云母纸的高绝缘特性。

将 AF 进行剥离制成的芳纶纳米纤维 (ANF) 不仅具有 AF 的优异性能, 并且拥有超高的长径比 (径向尺寸为纳米级, 长度为微米级) 和丰富的活性基团 (如酰胺基团等), 有效解决了 AF 反应活性和表面光滑等问题, 成为制备高性能绝缘纸的理想选择<sup>[15-16]</sup>。TAN J J 等<sup>[17]</sup>发现相较于传统芳纶绝缘纸, ANF 绝缘纸具有更加致密的结构, 更加优异的力学性能、电气性能和耐高温性能。进一步地, ANF 展现出的优异特性不仅有利于提升 ANF 之间的相互作用, 形成致密网络结构, 也为灵活设计功能芳纶绝缘纸提供了基础。例如, 研究者利用氮化硼纳米片作为导热基元与 ANF 共同构筑了一系列兼具高力学强度、高导热特性的 ANF 复合绝缘纸<sup>[18-19]</sup>。由此可得, 利用 ANF 作为构筑单元可以改善云母纸的力学强度和绝缘特性。然而, 传统的云母复合绝缘纸是以 ANF 为填充材料, 虽然可以在一定程度上改善纯云母纸的力学性能, 但会破坏纯云母纸的绝缘性能。因此, 如何有效地将 ANF 和 mica 进行复合, 解决它们在结合过程中可能出现的问题, 如相容性、界面效应等, 是当前亟需解决的瓶颈问题之一。

天然珍珠母贝壳以其高度有序的“砖泥结构”和精细的界面分子设计, 实现了高强度与高韧性的协同提升, 成为学者们广泛研究和模仿的模型<sup>[20]</sup>。LI Y J 等<sup>[21]</sup>通过分子内氢键作用在介质薄膜内形成致密的层状微结构, 从而显著提升薄膜的电气强度和热稳定性。CHEN J 等<sup>[22]</sup>通过将 BNNS 与聚合物纳米纤维结合, 构建了仿珍珠母贝壳结构的三维高效导热网络, 获得高热导率与高力学强度的绝缘介质材料。

综上, 本文以 ANF 为基体, mica 为填料, 通过真空辅助抽滤及热压的方式制备具有“砖泥结构”的 ANF/mica 复合绝缘纸, 并研究 mica 含量对复合绝缘纸微观形貌、拉伸强度以及击穿特性的影响规律。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

凯夫拉尔纤维 (Kevlar 29<sup>®</sup> 纤维), 黄色, 400D, 平均直径为 12  $\mu\text{m}$ , 东莞市索维特特殊线带有限公司; 天然云母, 透明浅银色, 100 目, 宁波双洋电工材料有限公司; 十六烷基三甲基溴化铵, 白色, 上海阿拉丁生化科技公司; 其他试剂, 均为分析纯, 中国成都科龙化学试剂有限公司。

### 1.2 ANF/mica 复合绝缘纸的制备

(1) 称取 1 g mica 和 1 g 十六烷基三甲基溴化铵分散在无水乙醇中, 充分搅拌后超声处理 30 min, 随后用无水乙醇反复彻底清洗, 在 45 $^{\circ}\text{C}$  真空环境下干燥 24 h 后得到干净的 mica 粉末备用。称取适量 mica 粉末, 加入 20 g 二甲基亚砷 (DMSO), 经超声处理 30 min, 制得 mica/DMSO 分散液。

(2) 将 Kevlar 29<sup>®</sup> 纤维剪碎至长度为 0.5 cm 的小段, 利用丙酮浸泡, 辅以超声清洗, 过滤掉丙酮后在 45 $^{\circ}\text{C}$  真空环境下干燥, 密封储存。称取处理过的 Kevlar 29<sup>®</sup> 纤维 (1 g) 加入到 KOH 浓碱溶液 (2 g KOH 和 10 mL 去离子水) 和二甲基亚砷 (DMSO) (500 mL) 的混合溶液中, 室温下避光搅拌 7 天, 得到暗红色的 ANF/DMSO 分散液。

(3) 称取 20 g ANF/DMSO 分散液, 加入 60 g 的 DMSO 进行稀释处理, 加入 Mica/DMSO 分散液与之混合, 并加入 DMSO 总体积的 4% 的去离子水进行质子化处理, 然后将混合溶液进行水浴超声、乳化剪切后得到复合浆料, 将复合浆料转移至抽滤瓶中, 真空抽滤成膜, 并依次浸入乙醇、去离子水中, 通过溶胶凝胶法去除残留的 DMSO、十六烷基三甲基溴化铵, 最后热压、干燥得到 ANF/mica 复合绝缘纸, 其中 mica 质量分数分别为 0%、5%、10%、15%、20% 的样品分别命名为纯 ANF 绝缘纸、ANF/Mica-5、ANF/Mica-10、ANF/Mica-15、ANF/Mica-20。

### 1.3 测试方法

采用扫描电子显微镜 (FEI 公司, 型号为 Quanta 250 FEG) 观察 ANF、mica 及复合绝缘纸的微观结构; 采用透射电子显微镜 (JEOL 公司, 型号为 JEM-

2100F)分析ANF的局部微观形貌;使用电子万能试验机(英斯特朗试验设备贸易有限公司,型号为Instron 2340)测试复合绝缘纸的拉伸性能;利用电击穿试验机(北京科朗测量仪器有限公司,型号为DDJ50kV)测定复合绝缘纸的电气强度及体积电阻率;借助差示扫描量热仪(美国TA公司,型号为Q2000)测试复合绝缘纸的耐温性能,并绘制DSC曲线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微观形貌结构分析

#### 2.1.1 Kevlar 29<sup>®</sup>纤维、ANF及mica微观形貌

图1为Kevlar 29<sup>®</sup>纤维、ANF及mica的微观形貌图。

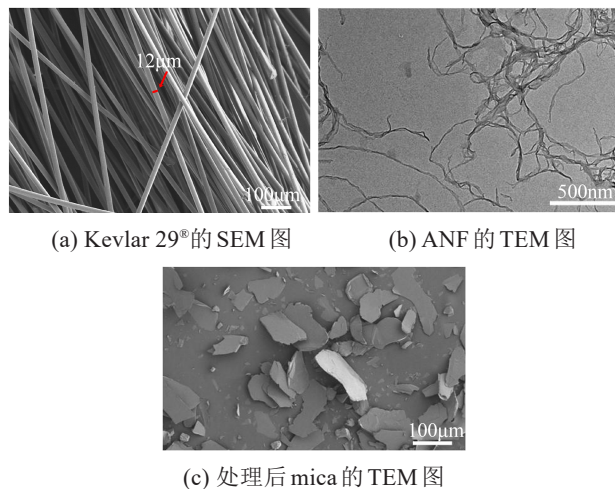


图1 Kevlar 29<sup>®</sup>纤维、ANF及mica的微观形貌图

Fig.1 Microscopic morphology of Kevlar 29<sup>®</sup> fiber, ANF, and mica

从图1(a)可以看出,单根Kevlar 29<sup>®</sup>纤维的直径约为12 μm,表面光滑无破损,呈化学惰性,与填充物之间界面作用差;而经过浓碱去质子化制备的ANF呈细长弯曲的网丝状,其相互缠绕呈网状结构,如图1(b)所示。ANF直径约为30 nm,长度达几微米以上,具有较高的长径比。从图1(c)可以看出,处理后的mica呈片状结构,且表面光滑平整无杂物,径厚比较大。另外,在十六烷基三甲基溴化铵和超声波共同作用下,mica产生轻微细碎化,出现小粒径鳞片,在一定程度上起到填充纸张空隙的作用。但大量mica碎片的出现会削弱其本身的绝缘性能,影响其综合利用价值<sup>[23]</sup>。

#### 2.1.2 ANF/Mica复合绝缘纸微观形貌

图2为不同mica含量复合绝缘纸和ANF/mica-

10溶液的SEM表征结果。

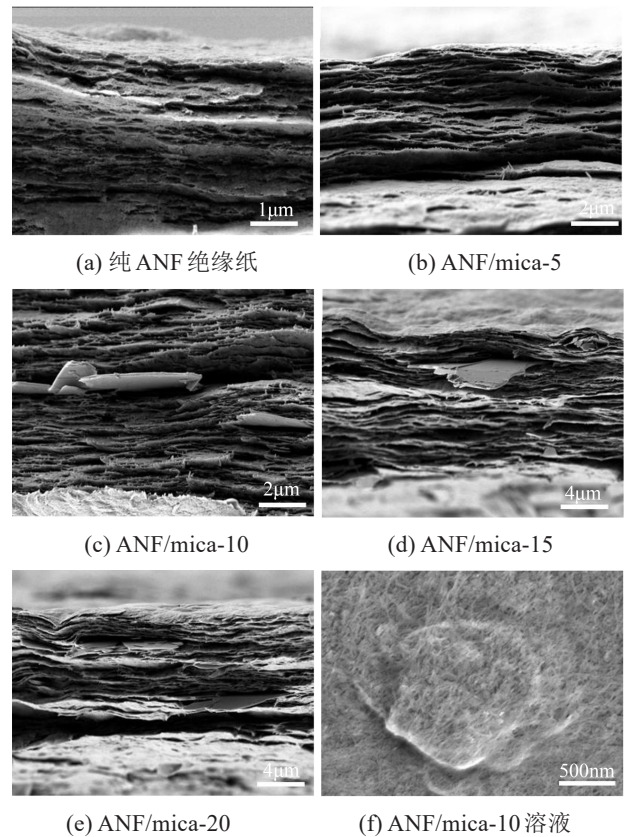


图2 不同mica含量的复合绝缘纸及ANF/mica-10溶液的SEM图

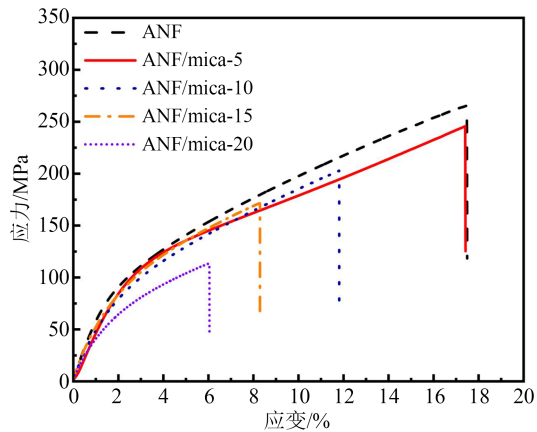
Fig.2 SEM images of composite insulating paper with different mica contents and ANF/mica-10 solution

从图2(a)可以看出,纯ANF绝缘纸的纤维之间紧密结合,形成致密的结构,但无明显的层状结构。从图2(b)~(e)可以看出,随着Mica的加入,在真空辅助抽滤过程中,片状mica的堆积减少了细微ANF通过微孔滤膜的损失,二者有序叠加,辅之以溶胶凝胶法改善真空抽滤带来的两面差,形成致密的“砖泥结构”。从图2(c)可以看出,当mica质量分数为10%时,mica平整地嵌入ANF之间,mica碎片填补了ANF中的空隙,弥补了纯ANF绝缘纸的缺陷,表现出高度致密的层状结构,有利于提高复合绝缘纸的整体性能。图2(f)为ANF/mica-10溶液的SEM图,从图中可以看出mica被ANF紧密缠绕、包覆,直观地表现出ANF的“泥”与片状mica的“砖”之间的紧密结构。

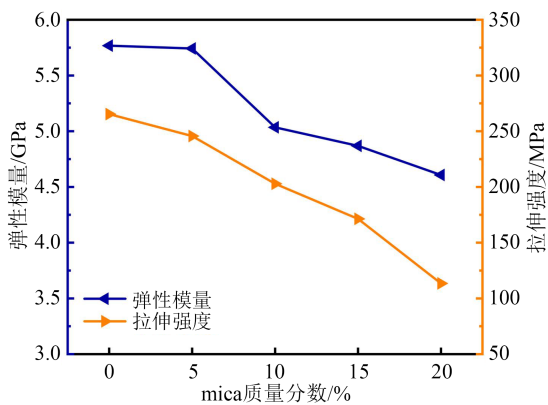
### 2.2 拉伸特性

ANF/mica复合绝缘纸的应力-应变关系、弹性模量及拉伸强度测试结果如图3所示。

由于ANF表面具有丰富的活性基团,分子内能



(a) 应力-应变关系



(b) 弹性模量和拉伸强度

图3 ANF/mica复合绝缘纸的拉伸特性

Fig.3 The tensile properties of ANF/mica composite insulating papers

形成广泛的氢键作用和苯环的 $\pi$ - $\pi$ 共轭作用,因此纤维之间结合紧密,纯ANF绝缘纸表现出优异的拉伸特性。从图3可以看出,纯ANF绝缘纸的拉伸强度、拉伸应变和弹性模量分别达到了265.33 MPa、17.5%、5.76 GPa, ANF/mica的拉伸强度、拉伸应变和弹性模量随着mica含量的增加而逐渐降低。虽然mica的加入有助于在ANF/mica复合绝缘纸内部构筑“砖泥结构”,但也在一定程度上带来了界面效应,导致应力分布不均匀,多数集中在复合绝缘纸界面薄弱处,从而劣化复合绝缘纸的力学性能,最终使材料损伤断裂。虽然mica的加入劣化了纯ANF绝缘纸的拉伸特性,但相对于纯云母纸以及利用AF作为补强材料的芳纶云母纸<sup>[13-14]</sup>, ANF/mica-10复合绝缘纸的拉伸特性仍较好,拉伸强度、应变和弹性模量分别为171.41 MPa、11.81%、4.89 GPa。

### 2.3 绝缘性能

绝缘纸的电绝缘性能对于电气设备的正常运行至关重要,对纯ANF绝缘纸和ANF/mica复合绝

缘纸在500 V/s的高直流电压升压速率下的电气强度和直流1 000 V下的体积电阻率进行测试,结果如图4和图5所示。

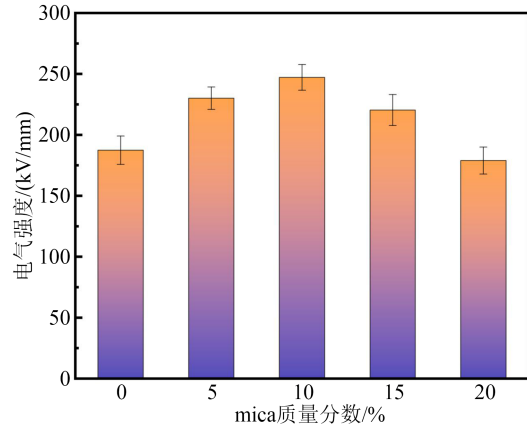


图4 ANF/mica复合绝缘纸的电气强度

Fig.4 The electric strength of ANF/mica composite insulating paper

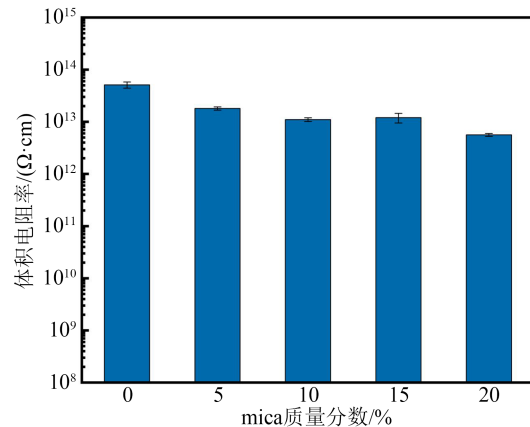


图5 ANF/mica复合绝缘纸的体积电阻率

Fig.5 The volume resistivity of ANF/mica composite insulating papers

从图4可以看出,ANF/mica-10复合绝缘纸的电气强度为247.14 kV/mm,相较于纯ANF绝缘纸(187.45 kV/mm)提升了31.8%。这主要得益于mica本身优异的电气强度,mica的加入显著改善了ANF/mica复合绝缘纸的电气强度。ANF/mica-10复合绝缘纸具有致密的“砖泥结构”,且适量的mica碎片填补了纸张中的空隙,从而促进了电荷的横向耗散,为电树枝的发展提供了曲折的路径。然而,随着mica含量的进一步增加,ANF/mica复合绝缘纸出现结构缺陷,并且mica碎片的增加不利于发挥其优异的电绝缘特性,导致复合绝缘纸的电气强度下降。

从图5可以看出,纯ANF绝缘纸和ANF/mica复

合绝缘纸均具有较高体积电阻率( $>10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ ),表明它们都具有优良的电绝缘性能。其中,纯ANF绝缘纸的体积电阻率为 $5.1 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ ,而ANF/mica-20复合绝缘纸的体积电阻率为 $5.6 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。这一体积电阻率的略微下降是由于高含量mica的团聚导致的,并且在复合绝缘纸中引入了空隙和缺陷。

#### 2.4 耐温性能

纯ANF绝缘纸和ANF/mica-10复合绝缘纸的DSC曲线如图6所示。

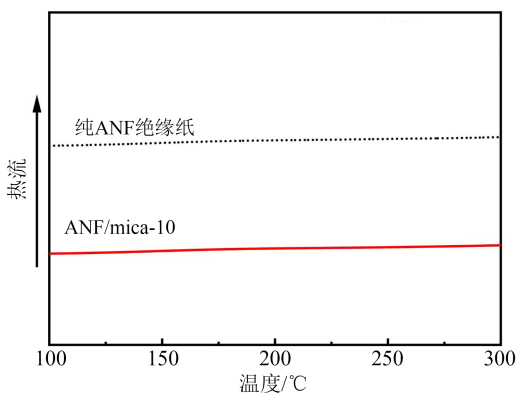


图6 ANF/mica复合绝缘纸的DSC曲线

Fig.6 DSC curves of ANF/mica composite insulating papers

从图6可以看出,纯ANF绝缘纸和ANF/mica-10复合绝缘纸在温度为100~300°C内未出现明显的吸收峰,说明其玻璃化转变温度高于300°C。纯ANF绝缘纸因其内部存在强氢键作用和苯环 $\pi$ - $\pi$ 共轭作用,展现出优异的热稳定性<sup>[24]</sup>。引入mica后,绝缘纸内部形成“砖泥结构”,这限制了大分子链的流动,增强了材料内部的作用力,使得ANF/mica-10复合绝缘纸同样具有优异的热稳定性。

### 3 结论

本文通过复合ANF和mica,制备出具有“砖泥结构”的ANF/mica复合绝缘纸,并对其微观结构、拉伸特性、绝缘性能以及耐温性能进行了深入研究,主要得到以下结论:

(1)十六烷基三甲基溴化铵和超声处理的共同作用有利于提升mica表面活性,增强其在ANF基体间的界面粘结力,同时产生mica碎片。

(2)在真空辅助抽滤下,mica与ANF有序堆叠,而Mica碎片可以填补复合绝缘纸内部空隙,有利于形成致密的“砖泥结构”。

(3)虽然mica在复合绝缘纸内部产生界面效应导致复合绝缘纸的拉伸性能下降,但ANF/mica-10

复合绝缘纸的拉伸特性仍相对较好。

(4)mica为电树枝的发展提供了曲折的路径,显著改善ANF/mica复合绝缘纸的电气强度。然而,高含量mica不仅使绝缘纸出现结构缺陷,而且带来更多的mica碎片,不利于发挥其优异的电绝缘特性,导致复合绝缘纸电气强度和体积电阻率的下降。

(5)纯ANF绝缘纸和ANF/mica-10复合绝缘纸均展现出优异的热稳定性,其玻璃化转变温度均高于300°C。

### 参考文献 References

- [1] 谷建国,王世萍,孙小茜.电气绝缘材料的性能与发展[J].化学工程师,2002,91(4):54-55.  
GU J G, WANG S P, SUN X Q. Property and development of normal dielectric insulating material[J]. Chemical Engineer,2002, 91(4):54-55.
- [2] 巩智利,李强军,张晓晶,等.电动汽车电机用绝缘材料与变速箱油相容性研究[J].绝缘材料,2022,55(6):45-50.  
GONG Z L, LI Q J, ZHANG X J, et al. Study on compatibility between insulating materials and transmission fluid for electric vehicle motor[J]. Insulating Materials,2022,55(6):45-50.
- [3] 满宇光.大型高压发电机的绝缘材料发展概述[J].绝缘材料, 2014,47(1):12-16.  
MAN Y G. Insulating materials develop summary of large high voltage generator[J]. Insulating Materials,2014,47(1):12-16.
- [4] 张小伟.云母板边角料回收再利用新技术[D].武汉:武汉理工大学,2007.  
ZHANG X W. The new technology of recycling and utilizing mica plate leftover material[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2007.
- [5] STONE G C, MILLER G H. Progress in rotating-machine insulation systems and processing[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2013,29(4):45-51.
- [6] LU Z Q, ZHANG M Y, HUA L, et al. Study on improvement effect of aramid fiber and PVA fiber on of mica paper strength and dielectric properties[J]. Advanced Materials Research,2011,214: 508-512.
- [7] LIN M Y, LI Y H, OU Y H. et al. Thermally conductive nanostructured, aramid dielectric composite films with boron nitride nanosheets[J]. Composites Science and Technology, 2019, 175: 85-91.
- [8] 袁玥,李鹏飞,凌新龙.芳纶纤维的研究现状与进展[J].纺织科学与学报,2019,36(1):146-152.  
YUAN Y, LI P F, LING X L. Research status and progress of aramid fibers[J]. Journal of Textile Science and Engineering,2019,36 (1):146-152.
- [9] 李新新,张慧萍,晏雄.芳纶纤维生产及应用状况[J].天津纺织科技,2009(3):4-9.  
LI X X, ZHANG H P, YAN X. Production and application status

- of aramid fiber[J]. *Tianjin Textile Technology*,2009(3):4-9.
- [10] 廖瑞金,李萧,杨丽君,等. 间位芳纶短切纤维/浆粕的对比对芳纶绝缘纸性能的影响[J]. *高电压技术*,2015,41(2):364-373.
- LIAO R J, LI X, YANG L J, et al. Effect of the ratios of aramid fiber to pulp on the properties of aramid paper[J]. *High Voltage Engineering*,2015,141(2):364-373.
- [11] 张小伟. 高性能复合云母纸的制造技术及增强机理的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
- ZHANG X W. Technology of producing high performance mica paper composite and research of its enhancement mechanism [D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2011.
- [12] MITSUI H, INOUE Y, SEINO S. Improvement of rotating machinery insulation characteristics by using mica paper containing aramid fiber[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1983,18(6):651-656.
- [13] 张翼,李书武. 纤维对云母纸性能的影响研究[J]. *绝缘材料*, 2013,46(3):64-66.
- ZHANG Y, LI S W. Effect of fiber on the properties of mica paper[J]. *Insulating Materials*,2013,46(3):64-66.
- [14] 王腊梅,陆赵情,张美娟,等. 芳纶短切纤维-芳纶浆粕增强云母纸性能的研究[J]. *中国造纸*,2016,35(4):33-36.
- WANG L M, LU Z Q, ZHANG M J, et al. Improvement of mica paper properties by using aramid fibers[J]. *China Pulp & Paper*, 2016,35(4):33-36.
- [15] YANG B, WANG L, ZHANG M Y, et al. Fabrication, applications, and prospects of aramid nanofiber[J]. *Advanced Functional Materials*,2020,30(22):2000186.
- [16] ZHANG B, WANG W C, TIAN M, et al. Preparation of aramid nanofiber and its application in polymer reinforcement: a review [J]. *European Polymer Journal*,2020,139:109996-110005.
- [17] TAN J J, LUO Y W, ZHANG M Y, et al. Dissolving and regeneration of meta-aramid paper: converting loose structure into consolidated networks with enhanced mechanical and insulation properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2021,13(14): 16895-16905.
- [18] WU K, WANG J M, LIU D Y, et al. Highly thermoconductive, thermostable, and super-flexible film by engineering 1D rigid rod-like aramid nanofiber/2D boron nitride nanosheets[J]. *Advanced Materials*,2020,32(8):1906939.
- [19] MA T B, ZHAO Y S, RUAN K P, et al. Highly thermal conductivities, excellent mechanical robustness and flexibility, and outstanding thermal stabilities of aramid nanofiber composite papers with nacre-mimetic layered structures[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2020,12(1):1677-1686.
- [20] CHEN S M, GAO H L, SUN X H, et al. Superior biomimetic nacreous bulk nanocomposites by a multiscale soft-rigid dual-network interfacial design strategy[J]. *Matter*,2019,1(2):412-427.
- [21] LI Y J, LIANG Q Q, LIU X Y, et al. Preparation of aromatic polyamide with ultra-high intrinsic breakdown strength via layered stacking structure induced by coplanar monomer[J]. *Polymer*,2022,255:125170.
- [22] CHEN J, HUANG X Y, SUN B, et al. Highly thermally conductive yet electrically insulating polymer/boron nitride nanosheets nanocomposite films for improved thermal management capability[J]. *ACS Nano*,2019,13(1):337-345.
- [23] 袁世波. 芳纶纤维/云母纸基复合绝缘材料的制备及界面强化机理研究[D]. 西安:陕西科技大学,2019.
- YUAN S B. Preparation and interfacial strengthening mechanism of aramid fiber-mica paper based insulation materials[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2019.
- [24] 魏祎迪,崔芯悦,张世龙,等. 芳纶纳米纤维/钛酸钡纳米纤维复合电介质薄膜制备与介电性能研究[J]. *绝缘材料*,2024,57(5): 20-25.
- WEI Y D, CUI X Y, ZHANG S L, et al. Preparation and dielectric properties of aramid nanofiber/barium titanate nanofiber composite dielectric film[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(5): 20-25.

收稿日期:2024-06-12;修回日期:2024-08-04。

作者简介:

赵莉华(1968-),女(汉族),四川成都人,副教授,主要从事变压器绝缘及状态检测技术的研究;

通信作者:任俊文(1987-),男(汉族),四川成都人,副研究员,主要从事高电压与绝缘技术的研究。