环氧树脂功能复合材料在新能源电力领域中的应用

文 娅，凌秋霞*，魏 瑗

（四川工商学院，四川 成都 611134）

摘 要 环氧树脂功能复合材料凭借优异的电绝缘性、导热性、力学性能及环境适应性，被广泛应用于新能源电力中。本文阐释了该类材料的定义，以及其在风电、光伏、储能等场景中的应用优势，重点分析了三类典型复合材料的具体应用途径，如绝缘型复合材料通过纳米改性等策略，切实提升定子绕组、逆变器隔板及电池模组的绝缘可靠性与耐候性；导热型复合材料借助氮化硼、碳纳米管等填料构建高效热传导路径，有效解决了传统树脂散热瓶颈；可降解型复合材料基于动态共价键或生物基原料设计，为电力设备的绿色回收与低碳制造提供了可行方案，旨在为提升电力设备的安全性与环境友好性提供技术参考。

关键词 环氧树脂材料；新能源电力；绝缘材料

基金项目：四川工商学院校级科研项目“面向高压电力应用的环氧树脂材料绿色转型与仿真研究”（项目编号：XJ2026YB012）。

中图分类号：TB33；TM61 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.002

0 引言

在全球能源体系加速向低碳清洁方向转变的趋势下，光伏、风电以及电化学储能等新型电力技术迎来了高速增长的局面，而这也对设备中的高性能绝缘材料与其他功能材料提出了更严格的要求。环氧树脂电绝缘性能好、力学强度高、工艺灵活，已成为新能源电力设备关键部件的首选基体材料。另外，通过功能填料改性与分子结构设计，环氧树脂功能复合材料在兼顾绝缘与导热、提升环境适应性等方面也表现良好。本文探究环氧树脂类功能复合材料在新能源电力行业中的实际应用情形以及技术发展走向，旨在为相关研究提供参考。

1 环氧树脂功能复合材料的定义

环氧树脂功能复合材料是一种以环氧树脂作为连续相基体，与纤维、颗粒这类增强相，以及各种功能性填料复合在一起而形成的高性能多相材料。环氧树脂基体在固化后，会形成三维交联网络结构，这可以使材料具备良好的力学性能、尺寸稳定性以及耐腐蚀性。如果在其中再加入一些具有特殊光、电、热或磁性能的填料，即可使其在保留环氧树脂本身优点的同时，让复合材料拥有导电、导热、绝缘或者特定的介电性能[1]。此类材料在新能源电力领域的应用较多，如高导热绝缘封装材料、非线性电导调控材料，以及结构—功能一体化的复合材料等。

2 环氧树脂功能复合材料在新能源电力中的应用优势

环氧树脂功能复合材料在新能源电力领域中的应用具有明显优势，并主要体现在以下五个方面：

一是电绝缘性能好，且介电特性可灵活调整。环氧树脂固化后会形成三维交联网络，电阻率极高，击穿场强大，绝缘效果极佳。如果在其中加入一些功能性纳米填料，还可引入深能级陷阱，抑制电荷迁移和积聚。如此一来，即便是在高温或强电场条件下，材料的绝缘可靠性也能得到明显提升。

二是材料可以同时实现高导热和电气绝缘。现如今，新能源电力设备都在向功率密度高、体积小的方向发展，并对散热有着较为严格的要求。环氧复合材料通过构建三维导热网络，或在分子层面做有序设计，可在保证高绝缘强度的同时，极大程度地提升导热性能，有效缓解了因为热电耦合应力引起的沿面放电或局部过热问题。

三是优良的力学性能与结构适应性。经过纤维增

作者简介：文娅（1996-），女，硕士研究生，工程师，研究方向：电气设备、绝缘材料。

*通信作者：凌秋霞（1996-），女，硕士研究生，助教，研究方向：交通规划、绿色节能。E-mail：1547616139@qq.com

强或纳米增韧改性后，环氧树脂功能复合材料强度高、模量大，抗冲击韧性好，能够有效承载电力设备在安装与运行过程中承受的机械负荷与电致应力，适用于绝缘拉杆、支撑件等关键受力部件。

四是耐候性和环境适应能力强。脂环族环氧这类特种树脂体系，在电晕老化、湿热环境、高低温循环等复杂工况下，具有明显的抗老化优势。其硬度、憎水性、界面黏结性，均明显优于传统硅橡胶材料。因此，在沿海、高寒或是强风沙等苛刻环境中，环氧树脂功能复合材料也能确保电力装备的长期稳定运行。

五是工艺适应性强。环氧树脂体系黏度可控、固化收缩率低，可采用浇注、浸渍、缠绕及模压等多种成型工艺，能够与纤维增强相、金属嵌件进行有效的一体化集成制造，从而满足新能源电力设备对复杂绝缘结构与封装形态的多样化需求。

3 环氧树脂功能复合材料在新能源电力中的具体应用

3.1 环氧树脂绝缘复合材料的应用

环氧树脂绝缘复合材料这类功能性材料，通常以环氧树脂为主体成分，并借助无机填料掺杂、纤维增强体引入或化学改性等多种手段来制备。从发展历程上看，人工合成高分子材料在电气绝缘领域的应用，可追溯至二十世纪初的酚醛树脂的研发与使用，这一阶段标志着该类材料进入了工程应用的新阶段。

现如今，环氧树脂功能复合材料被广泛应用于各类电力系统中。无论是低压、中压等级的配电网络，还是高压、特高压交流与直流输电工程，这类材料均已成为常见选择。在具体实践中，采用环氧复合材料进行浇注成型，可有效提升电气设备的介电性、耐化学腐蚀性、抗热老化能力以及机械强度等[2]。这一方面可以极大程度地延长电力装备的实际使用年限，另一方面也能确保系统更安全、更稳定地运行。环氧树脂复合材料凭借其自身良好的综合性能，已被我国的诸多核电站、输配电网及发电机组用于关键的绝缘部件。例如：换流站及变电站中的复合横担、穿墙套管、干式变压器以及多种绝缘子等关键部位，均大量应用了此类材料。可以说，环氧树脂绝缘复合材料在电力设备绝缘体系中发挥着重要作用。具体而言，主要表现在以下几个方面：

1. 在大型风电电机中，将纳米氧化铝掺入树脂基体以提升其绝缘等级，已经成为定子绕组防护体系的主流技术方案。相关测试数据显示，相较于传统材料，该材料的介质损耗可降低 40% 左右，击穿场强也可达到 35 千伏 / 毫米。为适应海上风电高盐高湿的特殊运行环境，环氧树脂绝缘复合材料所开发的超疏水环氧绝缘涂层表现出良好的性能。其表面水接触角可达 152°，疏水性极强。即使经过长达 5 000 小时的盐雾老化试验，涂层的电气性能衰减仍低于 5%，切实降低了恶劣气候条件下绝缘材料的老化速率，对延长设备服役寿命具有积极作用。

2. 针对水电机组定子线棒，可施加一种由环氧基质构成的抗盐蚀屏蔽层；该屏障凭借紧密的微观结构能够有效截留水汽、氯化物及颗粒物，阻断其对防晕结构及绝缘主体的劣化路径，从而有效延缓设备的全生命周期老化。

3. 在光伏发电系统中，其内部逆变器多采用玻璃纤维补强的环氧基板作为绝缘间隔。此种介质在高湿工况下表现出极低的环境敏感性，能够锁定表面电阻参数不漂移，为设备电气绝缘的可靠性提供了重要保障。

4. 储能系统中的锂离子电池模组，也广泛应用环氧树脂绝缘材料。此类组件是将阻燃与绝缘功能整合于一体，如此可以维持较高体积的电阻率数值，并在电池热失控时，延迟火灾的蔓延速度，保障系统安全。

5. 在提升环氧树脂绝缘性能方面，填料的尺度与类型是较为关键的因素。杨国清等的研究显示，加入 5% 的纳米级 A1203 即可有效改善材料的击穿性能；使用 20% 微米级 A1203 时，则会使击穿强度降低，但导热率却提升明显，增幅甚至可达 65%。马万里等制备的氮化硼、环氧树脂材料也证实，纳米填料的引入可有效提高复合体系的绝缘特性。

综合来看，应用于电气设备的绝缘材料，除需具备出色的电气绝缘特性外，还应具有对热冲击的热稳定性、抵御化学侵蚀的惰性以及抵抗物理形变的刚性结构。实际上，电力设备能否长期保持高效稳定运行，通常是依赖这些性能间的协同配合。

3.2 环氧树脂导热复合材料的应用

现阶段，随着电力装备不断向紧凑化、小型化的方向发展，设备输出功率也在持续提升，单位体积内发热量明显增加，故而也对系统中热源部件的散热能力提出了更高的要求。在此情况下，环氧树脂复合材料作为与其紧密接触的材料，需要同时满足更为严格的热稳定性与导热能力要求[3]。目前，纳米技术已被广泛采用，研究人员制备出多种纳米复合填料，切实改善了环氧树脂的导热特性。

环氧树脂复合材料的导热性能，主要取决于填料的导热系数及其添加比例，并与填料的尺寸、种类、几何形状等因素紧密相关。通常而言，在填料种类相

同的情况下，使用较大尺寸的填料可在较低填充量下构建出较为高效的声子传输通道，如此即可在有效节约用量的同时，确保其具备较好的导热效果。另外，填料的外形也很关键。例如：球形填料在体系中易均匀分散和排列；并且由于片状填料的比表面积较大，故而更易互相搭接并形成有效的热传导路径；而纤维状填料则可有效降低复合材料内部的界面热阻。

为增强填料与环氧树脂基体的相容性、减少团聚现象，对填料（尤其是纳米粒子）进行表面改性已经成为提升复合材料综合性能的重要途径之一[4]。多项研究通过不同填料的引入与改性，切实改善了环氧树脂的导热与介电特性。在提升环氧树脂导热性能的研究中，填料形貌调控与表面修饰是两种有效途径。Olifirov等通过调整铝及铝碳复合填料的颗粒尺寸与形状，制得环氧复合材料的热导率最高为23 W/(m•K)。另一策略是采用表面功能化改善界面结合，如Huang等借助聚硅氧烷对氮化硼纳米管进行修饰，并制备相应环氧体系[5]。研究发现，功能化填料添加30%时，材料介电常数与介电损耗明显下降，导热系数则上升约1 360%。

在环氧树脂导热性能优化中，低填充高导热的实现受到关注。一种方法是在环氧基体中同时引入含氧聚合物增容剂与多层石墨烯纳米板，如Yeom等的研究表明，该体系在填料用量较低时即可获得良好的传热性能。另一种方法是通过设计特殊形貌的复合填料也能有效提升导热效果，如CHEN T等采用片状与颗粒混杂的锌铜填料（质量比1:2）填充环氧树脂，材料热导率达到0.5 008 W/(m•K)，较单一锌粉体系提高约137.9%。除导热性能外，电学响应也是重点研究方向，Shen等系统考察了炭黑与碳纳米管混合填料对环氧复合材料电阻—温度特性的影响规律。

环氧树脂复合材料导热性能的高效提升可通过低填充量实现。例如：中国科学院大学Huang等的研究表明，当氮化硼纳米管添加量为10%时，环氧纳米复合材料的导热系数增加650%，其介电常数与损耗仍维持在较低范围。未来研究重点预计将集中于两方面：一是开发同时具备高绝缘性与优异导热性能的材料；二是设计可随工作温度调节特性的智能热界面材料。此类材料的进展将推动新能源电力设备向更高效率与可靠性的方向发展。

3.3 环氧树脂可降解复合材料的应用

环保要求的提升推动了对可循环环氧树脂复合材料的研究。此类材料的设计关键是在环氧网络中引入可逆化学键，使其能在外部刺激下发生解聚，从而实现回收与再加工。可逆化学键主要包括可逆共价键（二硫键、酯键、亚胺键）以及非共价相互作用（氢键、金属配位与 π－π 堆积）。但现实是，基于非共价作用构建的环氧网络往往结构稳定性不足，材料在力学强度方面表现欠佳，并且在受到较大应力时容易出现脆性断裂，进而对其工程应用产生了一定程度的限制。基于可逆共价键构建的聚合物网络具有明显的温度响应特征。在温度低于特定阈值时，分子链段运动受限，材料网络结构能够维持稳定状态。而当温度升高超过该阈值，分子链活动性明显增强，此时可逆共价键可发生交换反应，进而导致网络拓扑出现软化甚至流动现象，从而使材料获得再次成型、重塑以及循环利用的潜力。

以生物质为来源的环氧树脂系统是当前的研究方向之一，相关成果不断涌现。例如：利用香草醛等天然化合物合成的新型环氧胶料，在堆肥环境中可在半年内实现约80%的降解。此外，在光伏组件接线盒等非承力部件中，此类材料在整个使用寿命期间，其机械强度仍能保持在85%以上，实现了较好的环境相容性，为新能源电力设备的绿色化提供了多元化的材料选择。

4 结束语

环氧树脂基复合材料凭借其出色的综合性能，已成为电力系统中的关键材料。无论是传统输配电设备，还是风电、光伏等新能源电力系统，该类材料均具有广泛的应用。随着电力技术的不断进步，对其性能的需求也持续提升。未来，此类材料的研究与应用将更多围绕功能集成化、性能提升以及环境友好性的方向深入推进，从而满足电力系统日益增长的材料需求，并为构建更安全高效的现代电力系统注入新的技术活力。

参考文献：

[1] 郑天麒.碳纤维改性环氧树脂基复合材料的制备及性能研究[J].功能材料,2022,53(12):12147-12151.
[2] 许江.氧化石墨烯改性碳纤维/环氧树脂体育复合材料及性能试验[J].塑料助剂,2022(05):6-10,31.
[3] 谭永松,朱俊荣,陈坤林,等.石墨烯复合环氧树脂涂层的制备及其性能[J].精细化工,2021,38(01):78-82.
[4] 慎志勇,李利华,李茂,等.液晶改性环氧树脂的制备及其热-力学性能协同提升研究[J].绝缘材料,2026,59(03):148-154.
[5] 董倩,司英莲,古玺玉,等.臭氧氧化处理提升电气绝缘用环氧树脂直流击穿强度研究[J].绝缘材料,2026,59(03):126-131.