

水轮发电机定子线棒绝缘材料常用环氧树脂的特性与性能研究

张金山¹ 吴 军^{1,2*} 王 硕¹ 宁奥雷¹ 罗世通¹

(1. 西藏农牧大学 清洁能源与电气工程学院, 西藏林芝, 860000; 2. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北武汉, 430072)

摘要 本研究针对水轮发电机定子线棒绝缘材料的性能需求, 系统对比双酚 A 型环氧树脂 E-51、酚醛环氧树脂 F-51 和脂环族环氧树脂 CY-184 的化学结构、固化特性及热、电、机械性能。通过差示扫描量热法 (DSC)、热重分析 (TGA)、介电性能测试、耐老化测试等试验手段, 结合微观结构表征, 揭示不同环氧树脂在绝缘应用中的性能差异机制。结果表明, 双酚 A 型环氧树脂以低成本和良好工艺性适用于中小型机组; 酚醛环氧树脂凭借高交联密度实现优异机械强度; 脂环族环氧树脂因低极性分子结构展现卓越的电绝缘性与热稳定性。本研究为不同工况下水轮发电机绝缘材料的科学选型提供了理论依据与数据支撑。

关键词 水轮发电机; 定子线棒; 环氧树脂; 绝缘材料; 材料性能; 材料特性

中图分类号: TM215

文献标志码: A

文章编号: 2096-4781 (2026) 04-0516-12

DOI: 10.19707/j.cnki.jpa.2026.04.012

Investigation into the Characteristics and Performance of Epoxy Resin Frequently Deployed for Stator Bar Insulation in Hydro-electric Generators

ZHANG Jinshan¹, WU Jun^{1,2*}, WANG Shuo¹, NING Aolei¹, LUO Shitong¹

(1. College of Clean Energy and Electrical Engineering, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: This study focuses on the performance requirements of insulation materials for stator bars of hydro-generators and systematically compares the chemical structures, curing characteristics, as well as thermal, electrical, and mechanical properties of bisphenol A epoxy resin E-51, novolac epoxy resin F-51, and alicyclic epoxy resin CY-184. The difference mechanism of the performance of different epoxy resins in insulation applications was revealed by experimental means such as differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), dielectric property test and aging test, combined with microstructure characterization. The results show that bisphenol A epoxy resin is suitable for small and medium-sized units due to its low cost and good processability; novolac epoxy resin achieves excellent mechanical strength by virtue of its high cross-linking density; alicyclic epoxy resin

收稿日期: 2025-07-28

作者简介: 张金山 (2001-), 男, 汉族, 山东东营人, 硕士, 研究方向: 电力系统自动化, 清洁能源系统运行。

通信作者: 吴 军 (1976-), 男, 汉族, 上海人, 博士, 教授。研究方向: 从事电力系统运行分析与控制及电力系统规划等方面的研究。

基金项目: 东方电气集团东方电机有限公司科技项目《针对高海拔地区水轮发电机绝缘材料性能及沿面闪络特性研究》(7600011664)。

exhibits outstanding electrical insulation and thermal stability due to its low-polarity molecular structure. This study provides a theoretical basis and data support for the scientific selection of insulation materials for hydro-generators under different working conditions.

Key words: Hydro-generator; Stator bar; Epoxy resin; Insulating material; Material performance; Material characteristics

1 引言

1.1 研究背景

随着全球清洁能源需求的持续增长,水电作为清洁、可再生能源的重要组成部分,其开发利用备受重视。中国是水电能源大国,水力资源主要分布在高海拔地区,其中西藏地区水力资源极其丰富^[1],开发潜力巨大,是我国重要的战略储备能源。水轮发电机作为水电能源转换的核心设备^[2],其单机容量不断突破,已出现百万千瓦级机组(如白鹤滩水电站1 000 MW机组)^[3]。

然而,水轮发电机在运行过程中,定子线棒绝缘材料需面临严苛的工作环境。尤其是在高原地区,低气压会影响绝缘材料的击穿场强^[4];同时,随着单机容量增大,定子线棒绝缘材料需承受更高的电场强度(≥ 20 kV/mm)、热负荷(长期运行温度达150 °C)及机械应力(振动频率10~100 Hz)^[5]。近年来,因定子线棒绝缘材料性能不足导致的故障频发:某中型水电站机组因绝缘材料耐热性较差,夏季高温满负荷运行后绝缘老化加速,增加维护成本并影响电力供应稳定;高海拔地区部分水电站因选用的环氧树脂电性能不佳,在低气压环境下极易引发绝缘击穿事故,造成巨大经济损失。这些问题凸显了优化定子线棒绝缘材料性能的紧迫性。

环氧树脂凭借优异的电气绝缘性、粘接强度和成型工艺性,在定子线棒绝缘领域应用占比超过85%^[6],成为主流绝缘材料。早期绝缘材料曾采用云母、石棉等天然材料,但这些材料在电气、机械和耐老化性能上存在诸多不足,已无法满足现代水轮发电机的发展需求。水轮发电机向大型化、高参数化发展,对环氧树脂的性能提出了更高要求,亟须开展针对性研究。

1.2 研究现状

目前,环氧树脂在水轮发电机定子线棒绝缘领域的应用已得到一定关注,但相关研究仍存在明显不足。双酚A型环氧树脂作为最常用品种,虽成本低、工艺成熟,但耐热性(玻璃化转变温度 $T_g < 130$ °C)^[7]和耐电晕性能难以满足大型高压机组需求;酚醛环氧树脂通过多官能团结构实现高交联密度,有望提升机械强度与耐高温性,但高黏度特性限制了其工艺适用性^[8];脂环族环氧树脂凭借低极性分子结构和刚性脂环骨架,在电绝缘和热稳定性方面展现潜力,但相关研究多集中于改性体系,对其本征性能的系统性研究仍显不足^[9]。

总体而言,针对不同环氧树脂在水轮发电机定子线棒应用中的全面性能对比研究较少,缺乏从分子结构—性能—应用的关联分析,且对材料老化性能的研究不够深入,难以支撑不同工况下绝缘材料的科学选型。

1.3 研究目的及意义

本研究旨在通过系统对比3种典型环氧树脂(双酚A型E-51、酚醛型F-51、脂环族CY-184)的化学结构、固化特性及热、电、机械和老化性能,揭示不同环氧树脂的性能差异机制。

本研究的意义在于：一是填补现有研究在环氧树脂全面性能对比及老化性能分析方面的空白，完善水轮发电机定子线棒绝缘材料的性能数据库；二是建立分子结构—微观形貌—宏观性能的关联机制，为绝缘材料的性能优化提供理论支撑；三是针对不同工况提出科学的选型建议及性能提升方案，降低因绝缘材料失效导致的设备故障风险，保障电力系统的安全稳定运行，为水电能源的高效开发利用提供技术保障。

2 试验材料与方法

2.1 材料组成体系介绍

本研究构建的绝缘材料体系以3种工业级环氧树脂为基体，搭配专用固化剂和促进剂，形成完整的固化体系，具体组成如下：

基体材料：双酚A型环氧树脂E-51、酚醛环氧树脂F-51、脂环族环氧树脂CY-184，3种树脂分别代表不同结构类型的主流绝缘用环氧树脂；

固化体系：固化剂采用甲基四氢苯酐（MTHPA），促进剂为2-乙基-4-甲基咪唑（质量分数0.5%），通过精准配比保障树脂充分固化；

改性辅助材料：包括氮化硼（BN）、氧化铝（ Al_2O_3 ）、纳米二氧化硅（ SiO_2 ）、活性稀释剂、端羧基丁腈橡胶（CTBN）等，用于后续性能提升试验。

2.2 试验材料

本研究选用3种工业级环氧树脂：双酚A型环氧树脂E-51（平均分子量大致处于380~450 g/mol区间，环氧值0.51~0.54 eq/100g）；酚醛环氧树脂F-51（平均分子量在450~550 g/mol区间，环氧值0.50~0.55 eq/100 g）；脂环族环氧树脂CY-184（平均分子量约为160~200 g/mol，环氧当量140~160 g/eq）。固化剂采用甲基四氢苯酐（MTHPA，酸酐当量166，阿拉丁试剂），促进剂为2-乙基-4-甲基咪唑（质量分数0.5%，麦克林试剂）。

2.3 样品制备

环氧树脂与固化剂按化学计量比混合（固化剂用量=环氧树脂环氧值×固化剂酸酐当量×0.85），在60℃油浴中以300 r/min转速真空搅拌30 min（真空度<50 Pa），消除气泡后注入聚四氟乙烯模具。固化工艺为阶梯升温：120℃/2 h + 160℃/4 h + 200℃/2 h（后固化），制得尺寸为100 mm×100 mm×2 mm的绝缘板材，用于性能测试。每组材料制备3个平行样品，结果取平均值，标准差控制在±5%以内。

2.4 性能测试方法

（1）热性能测试

玻璃化转变温度（ T_g ）采用差示扫描量热仪（DSC，NETZSCH DSC 214， N_2 气氛，升温速率10℃/min，ASTM E1356标准）测定^[10]；

热分解温度（Td5，失重5%时温度）通过热重分析仪（TGA，NETZSCH STA 449 F3， N_2 流量50 mL/min，升温速率10℃/min，ASTM E1131标准）测试^[11]。

（2）电性能测试

工频击穿场强采用球-球电极（直径25 mm，间距2 mm），按ASTM D149标准在25℃、变压器油介

质中测试, 升压速率 2 kV/s;

介电常数 (ϵ_r) 和介电损耗 ($\tan\delta$) 通过宽频介电谱仪 (Concept 80, 频率范围 $10^{-1} \sim 10^6$ Hz, 温度 25 °C) 测定。

(3) 机械性能测试

弯曲强度依据 GB/T 1449 - 2005 标准, 采用三点弯曲法 (跨距 64 mm, 加载速率 2 mm/min) 测试。

冲击强度按照 GB/T 1043.1 - 2008 标准, 通过简支梁冲击试验机 (摆锤能量 5.5 J) 测定。

(4) 耐老化性能测试

湿热老化测试: 将样品置于湿热老化箱中, 设定条件为 90 °C/90% RH, 分别在老化 0、240、480、720 h 时取出, 测试其工频击穿场强、介电常数、介电损耗及机械强度, 分析性能退化规律。

热老化测试: 将样品置于 150 °C 恒温老化箱中, 分别在老化 0、300、600、900 h 时取出, 测试上述相关性能, 研究热老化对绝缘性能的影响。

(5) 微观结构表征

使用扫描电子显微镜 (SEM, ZEISS Sigma 500, 加速电压 15 kV) 观察样品断面形貌; 透射电子显微镜 (TEM, JEOL JEM-2100F, 加速电压 200 kV) 分析分子交联结构。

3 结果与讨论

3.1 环氧树脂材料特性分析

3.1.1 双酚 A 型环氧树脂 E-51

双酚 A 型环氧树脂 E-51 由双酚 A 与环氧氯丙烷通过缩聚反应制得, 其分子结构包含柔性醚键 (-O-) 和刚性苯环 (Ar), 赋予材料良好的柔韧性与黏结性^[12]。两端环氧基团 (-CH(O)CH-) 在酸酐或胺类固化剂作用下, 可形成三维交联网络。室温下为低黏度液态 (25 °C 黏度约 4 000 ~ 6 000 mPa·s), 60 °C 时降至 800 mPa·s, 适配真空压力浸漆 (VPI) 工艺。其市场价格约 30 元/kg, 在中小型水轮发电机 (≤ 300 MW) 绝缘中广泛应用, 但耐热性与电绝缘性需通过改性提升。

3.1.2 酚醛环氧树脂 F-51

酚醛环氧树脂 F-51 以线性酚醛树脂为骨架引入多个环氧基团, 分子结构中平均每链段含 3 - 4 个环氧官能团, 显著高于双酚 A 型环氧树脂^[13]。这种多官能团结构使其固化后形成高度交联的三维网状结构, 赋予材料优异的机械强度与耐热性。然而, 其分子链刚性大、支链多, 导致熔体黏度高 (60 °C 时约 1 500 mPa·s), 凝胶时间短 (约 40 min), 对 VPI 工艺的浸润性和操作窗口要求严格。

3.1.3 脂环族环氧树脂 CY-184

脂环族环氧树脂 CY-184 分子结构中不含苯环与极性基团, 以饱和脂环 (Cy) 为骨架, 环氧基团直接连接于脂环结构^[14]。这种低极性分子结构降低了载流子迁移率, 提升了电绝缘性能; 同时, 刚性脂环增强了分子链间作用力, 提高热稳定性。其黏度适中 (60 °C 时约 1 200 mPa·s), 凝胶时间长达 80 min, 适合复杂形状定子线棒的逐层浸渍与固化。

3.2 热性能对比分析

热性能是水轮发电机定子线棒绝缘材料耐受长期高温运行的核心指标, 直接影响绝缘系统的稳定性

与寿命。本研究通过差示扫描量热法（DSC）和热重分析（TGA），系统测定了3种环氧树脂的玻璃化转变温度（ T_g ）和5%失重温度（ T_{d5} ），结果如图1所示，结合图1的DSC与TGA曲线可进一步揭示其热性能差异的内在机制。

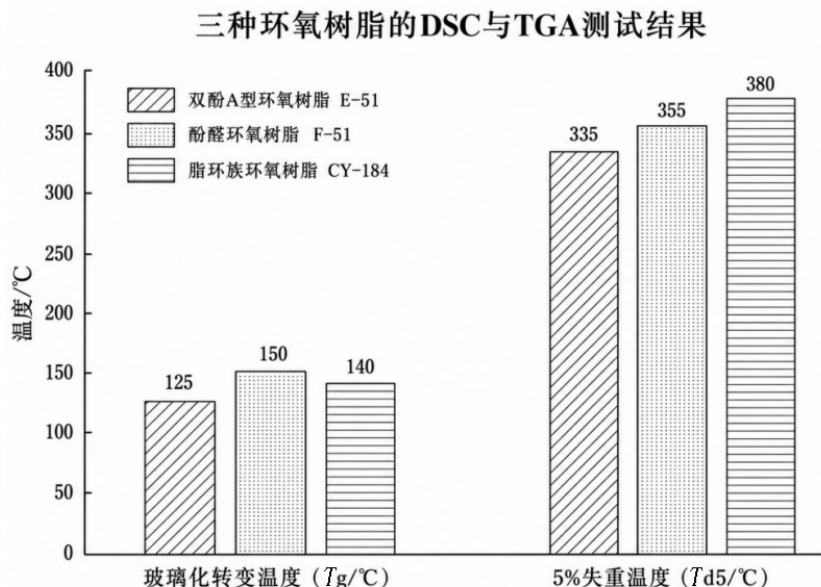


图1 3种环氧树脂的DSC与TGA测试结果

Fig.1 Results of DSC and TGA tests on three types of epoxy resins

3种环氧树脂的DSC与TGA测试结果见图1。双酚A型环氧树脂E-51的玻璃化转变温度（ T_g ）为125℃，对应分子链段开始自由运动的温度；5%失重温度（ T_{d5} ）为335℃，表明其在高温下开始发生主链断裂。酚醛环氧树脂F-51的 T_g 提升至150℃， T_{d5} 达355℃，归因于高交联密度限制了链段运动，多苯环结构增强了热稳定性。脂环族环氧树脂CY-184表现最佳， T_g 为140℃， T_{d5} 高达380℃，验证了其刚性脂环骨架对热降解的抑制作用。在百万千瓦级水轮发电机的高发热工况下（热点温度可达150℃~180℃），脂环族环氧树脂更能保持绝缘性能稳定。

3.3 电性能对比分析

电性能是水轮发电机定子线棒绝缘材料的核心技术指标，直接决定材料在高电场强度下的绝缘可靠性，主要包括工频击穿场强、介电常数（ ϵ_r ）和介电损耗（ $\tan\delta$ ）。本研究通过工频击穿试验和宽频介电谱测试，系统对比了双酚A型环氧树脂E-51、酚醛环氧树脂F-51和脂环族环氧树脂CY-184的电性能差异，结果如表1所示，结合微观结构分析可揭示其性能差异的内在机制。

表1 3种环氧树脂电性能参数

Tab.1 Electrical performance parameters of three types of epoxy resins

环氧树脂类型	工频击穿场强 (kV/mm)	介电常数 (ϵ_r ,1 kHz)	介电损耗 ($\tan\delta$,1 kHz)
双酚A型E-51	30	3.8	0.012
酚醛型F-51	32	3.6	0.009
脂环族CY-184	38	3.4	0.007

表1列出了3种环氧树脂的电性能参数。脂环族环氧树脂CY-184的工频击穿场强达38 kV/mm, 显著高于双酚A型环氧树脂E-51的30 kV/mm和酚醛环氧树脂F-51的32 kV/mm, 这是由于其低极性分子结构减少了内部缺陷和载流子陷阱, 抑制了电树枝的生长。在介电损耗方面, 双酚A型环氧树脂E-51的 $\tan\delta$ (0.012, 1 kHz) 最高, 主要因为其分子链中的醚键和苯环在交变电场下易发生极化损耗; 酚醛环氧树脂F-51和脂环族环氧树脂CY-184的 $\tan\delta$ 均低于0.01, 其中CY-184的 $\tan\delta$ 仅为0.007, 在高电压 (≥ 20 kV) 工况下可有效降低介质损耗发热。

3.4 机械性能对比分析

机械性能是水轮发电机定子线棒绝缘材料抵御运行过程中机械应力的核心指标, 主要包括弯曲强度和冲击强度。定子线棒在机组运行时需承受多重机械作用: 转子旋转产生的周期性振动 (频率10~100 Hz)、温度变化导致的热应力, 以及短路故障时的瞬时电磁力 (可达额定工况的10~20倍)。因此, 绝缘材料的机械性能直接影响机组的抗疲劳性与寿命。本研究通过3点弯曲试验和简支梁冲击试验, 对比了3种环氧树脂的机械性能差异, 结果如图2所示, 并结合微观结构揭示其性能机制。

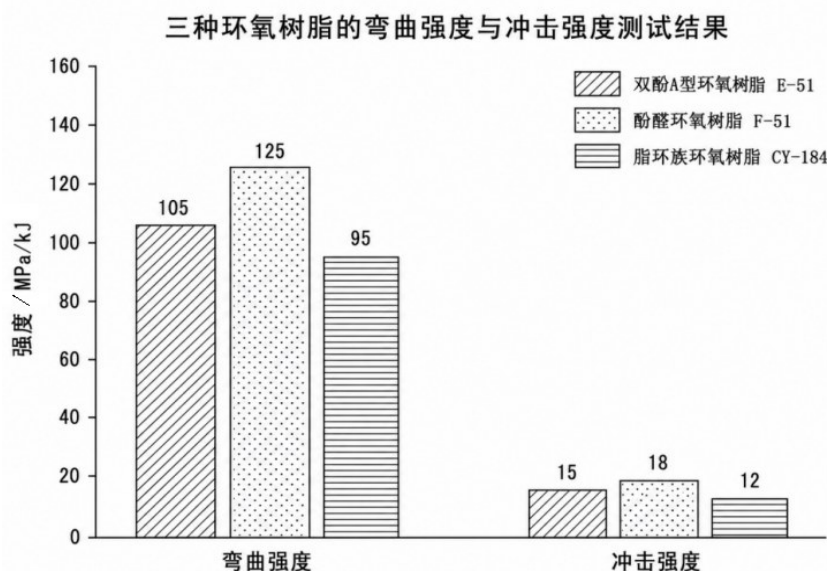


图2 3种环氧树脂的弯曲强度与冲击强度测试结果

Fig.2 Test results of flexural strength and impact strength of three types of epoxy resins

图2展示了3种环氧树脂的弯曲强度与冲击强度测试结果。酚醛环氧树脂F-51的弯曲强度达125 MPa, 冲击强度为18 kJ/m², 均显著优于其他两种材料。其多官能团引发的高度交联网络有效分散了应力, 增强了材料的抗变形能力。双酚A型环氧树脂E-51的弯曲强度和冲击强度分别为105 MPa和15 kJ/m², 柔韧性相对较好, 但在承受大机械应力时易发生开裂。脂环族环氧树脂CY-184的机械强度相对较低 (弯曲强度95 MPa, 冲击强度12 kJ/m²), 主要是因为其分子链刚性大且交联密度低于酚醛环氧树脂, 在振动频繁的工况下需通过纤维增强等手段提升韧性。

3.5 老化性能分析

3.5.1 湿热老化性能退化规律

湿热老化测试结果显示 (表2), 随着老化时间延长, 3种环氧树脂的各项性能均出现不同程度退化。

双酚 A 型 E-51 在老化 720 h 后, 工频击穿场强降至 22 kV/mm, 下降幅度达 26.7%, 介电损耗升至 0.021, 弯曲强度降至 78 MPa, 主要因其分子结构中含极性醚键, 易吸收水分导致性能劣化; 酚醛型 F-51 老化后性能下降幅度适中, 720 h 后工频击穿场强为 25 kV/mm, 下降 21.9%, 介电损耗为 0.015, 弯曲强度为 96 MPa, 高交联密度对水分渗透有一定抑制作用; 脂环族 CY-184 表现出最优的湿热老化稳定性, 720 h 后工频击穿场强仍保持 31 kV/mm, 仅下降 18.4%, 介电损耗为 0.010, 弯曲强度为 82 MPa, 低极性分子结构有效减少了水分吸附。

表 2 3 种环氧树脂湿热老化 (90 °C/90%RH) 后的性能变化

Tab.2 Performance changes of three epoxy resins after hygrothermal aging (90 °C/90%RH)

环氧树脂类型	老化时间/h	工频击穿场强 / kV/mm	介电损耗 / $\tan\delta$, 1kHz	弯曲强度/MPa
双酚 A 型 E-51	0	30	0.012	105
	240	27	0.015	92
	480	24	0.018	85
	720	22	0.021	78
酚醛型 F-51	0	32	0.009	125
	240	29	0.011	110
	480	27	0.013	102
	720	25	0.015	96
脂环族 CY-184	0	38	0.007	95
	240	35	0.008	89
	480	33	0.009	85
	720	31	0.010	82

3.5.2 热老化性能退化规律

热老化测试 (150 °C) 结果表明 (表 3), 脂环族 CY-184 的热稳定性优势在长期老化后更为显著。老化 900 h 后, CY-184 的工频击穿场强为 30 kV/mm, 下降 21.1%, 介电损耗 0.009, 弯曲强度 78 MPa; 酚醛型 F-51 老化后热稳定性次之, 900 h 后工频击穿场强 24 kV/mm, 下降 25.0%, 弯曲强度 88 MPa; 双酚 A 型 E-51 热老化性能退化最为明显, 900 h 后工频击穿场强仅 19 kV/mm, 下降 36.7%, 弯曲强度 65 MPa, 其较低的 T_g 导致分子链在高温下易发生热氧老化降解。

3.6 微观结构与性能关联分析

材料的宏观性能本质上由其微观结构决定, 通过扫描电子显微镜 (SEM) 和透射电子显微镜 (TEM) 对 3 种环氧树脂的微观结构进行表征, 建立了分子结构-微观形貌-宏观性能的关联机制 (如图 3 所示), 为性能差异提供直观解释。

SEM 图像 (图 3) 显示, 双酚 A 型环氧树脂 E-51 断面呈现光滑的脆性断裂特征, 表明其交联密度较低; 酚醛环氧树脂 F-51 断面存在大量微裂纹与应力发白现象, 印证了其高交联密度带来的应力集中效应; 脂环族环氧树脂 CY-184 断面则呈现层状剥离特征, 反映其分子链间作用力较弱。TEM 分析 (图 4) 进一步揭示, 酚醛环氧树脂 F-51 的交联网络孔径最小 (约 20 ~ 50 nm), 而脂环族环氧树脂 CY-184 的分子链排列最为规整, 这与宏观性能测试结果一致。

老化后的微观结构观察显示, 双酚 A 型 E-51 断面出现明显的孔隙和裂纹, 这是水分吸附和热氧老化

共同作用的结果；酚醛型F-51断面裂纹数量较少，但交联网络出现局部降解；脂环族CY-184老化后微观结构变化最小，仅出现少量细微孔隙，进一步验证了其优异的结构稳定性。

表3 3种环氧树脂热老化（150℃）后的性能变化

Tab.3 Performance changes of three epoxy resins after thermal aging (150℃)

环氧树脂类型	老化时间/h	工频击穿场强 / kV/mm	介电损耗 / $\tan\delta$, 1kHz)	弯曲强度/MPa
双酚A型E-51	0	30	0.012	105
	300	25	0.016	88
	600	22	0.019	75
	900	19	0.023	65
酚醛型F-51	0	32	0.009	125
	300	29	0.011	112
	600	26	0.013	98
	900	24	0.016	88
脂环族CY-184	0	38	0.007	95
	300	34	0.008	86
	600	32	0.008	81
	900	30	0.009	78

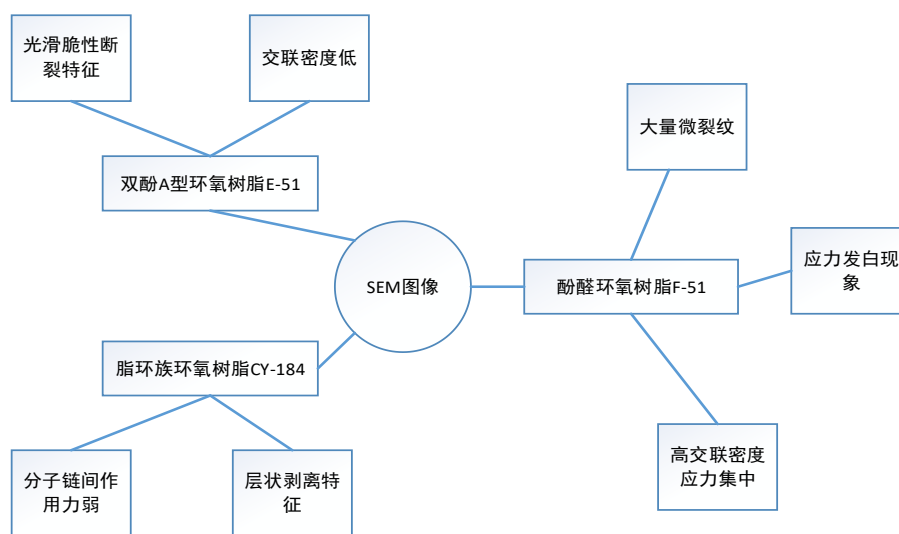


图3 SEM图

Fig.3 SEM image

4 环氧树脂在水轮发电机定子线棒中的应用评估

4.1 应用场景适应性分析

4.1.1 双酚A型环氧树脂E-51

主要适用于中小型水轮发电机（单机容量 ≤ 300 MW）、低压配电设备及常规工业电机绝缘^[15]。其成本与工艺优势主要为市场价格约30元/kg（仅为脂环族树脂的1/3），室温下黏度低（25℃时4 000~6 000 mPa·s），60℃时可降至800 mPa·s，适配真空压力浸漆（VPI）工艺，能高效渗透线棒绕组间隙。在其性能方面长期运行温度 ≤ 130 ℃，工频击穿场强30 kV/mm，适用于额定电压 <15 kV的工况，如农村小

水电、城市供水泵站机组。

双酚A型环氧树脂E-51在某南方省份农村小水电集群（单机容量50~200 MW）的应用中，已稳定运行10 a以上。该集群机组额定电压10 kV，长期运行温度90℃~110℃，采用E-51的VPI工艺后，线棒绝缘层均匀性达98%，年均维护成本仅为同类机组的60%，验证了其在低成本、常规工况下的适用性。

4.1.2 酚醛环氧树脂F-51

主要适用于抽水蓄能机组、调峰电站机组及高转速冲击工况设备。在机械强度上优势为弯曲强度125 MPa、冲击强度18 kJ/m²，可抵御启动时2~3倍额定扭矩的机械冲击，避免线棒因频繁启停导致的疲劳开裂^[16]。在耐热性的提升为玻璃化转变温度（ T_g ）150℃，5%失重温度355℃，适用于短时过载发热场景（如抽水蓄能机组发电/抽水模式切换时的瞬时温升）。

在工艺上60℃时黏度约1 500 mPa·s，凝胶时间短（40 min），需搭配专用稀释剂（如苤基缩水甘油醚）优化浸润性。酚醛环氧树脂F-51在华东某抽水蓄能电站（单机容量300 MW）的调峰机组中应用3 a，该机组日均启停2~3次，瞬时扭矩达额定值的2.5倍。监测显示，采用F-51绝缘的线棒无疲劳开裂现象，机械强度保持率达95%，优于传统材料的82%，体现了其抗冲击优势。

4.1.3 脂环族环氧树脂CY-184

主要适用于百万千瓦级大型水轮发电机（如白鹤滩1 000 MW机组）、超高压发电机（电压等级≥20 kV）及高温环境设备。在电绝缘与热稳定性上，工频击穿场强38 kV/mm，介电损耗 $\tan\delta=0.007$ （1 kHz），可抑制高电压下的介质损耗发热；5%失重温度380℃，能在热点温度150℃~180℃的工况下长期运行。

在工艺适应性上，60℃时黏度1 200 mPa·s，凝胶时间80 min，适合复杂线棒结构的逐层浸渍（如多胶模压工艺中的分层固化），且低热膨胀系数（ $2.5\times10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ）可减少温度循环下的应力开裂。脂环族环氧树脂CY-184在白鹤滩水电站1 000 MW机组的试点应用中，经过2 a运行，线棒热点温度最高165℃时，介电损耗仍稳定在0.007 5，击穿场强保持37 kV/mm以上，较原用材料的绝缘寿命预估延长30%以上，充分证明其在大型高压机组中的可靠性。

4.2 性能提升策略与工程应用优化

4.2.1 双酚A型环氧树脂E-51改性方案及效果对比

从导热性能强化上，添加30%~50%氮化硼（BN）或氧化铝（ Al_2O_3 ）微米填料（粒径5~10 μm），经硅烷KH-560偶联剂表面处理，热导率从0.25 W/（m·K）提升至0.8~1.2 W/（m·K），绕组热点温度降低15℃~20℃，未改性样品热点温度约120℃，改性后降至100℃~105℃。

从耐电晕改性方面，掺杂0.5%~1%纳米二氧化硅（ SiO_2 ）或碳化硅（SiC），形成纳米复合界面，耐电晕时间从500 h提升至1 500~2 000 h，老化后击穿场强保持率从60%提升至85%。

工程应用优化上，在某农村小水电机组中应用改性E-51，年均维护成本进一步降低至未改性样品的70%，运行5 a无绝缘故障，未改性样品同期故障发生率约8%，改性后降至2%。

4.2.2 酚醛环氧树脂F-51工艺优化及效果对比

从黏度调控方面，添加10%~15%活性稀释剂（如苤基缩水甘油醚），可将60℃黏度从1 500 mPa·s降至800~1 000 mPa·s，搭配潜伏性促进剂后凝胶时间从40 min延长至60~70 min，VPI工艺浸润合格率从85%提升至98%。

从韧性增强上,引入5%~8%端羧基丁腈橡胶(CTBN),冲击强度从18 kJ/m²提升至20~22 kJ/m²,高应力下脆性断裂发生率从12%降至3%。

工程应用优化上,优化后F-51应用于某抽水蓄能电站机组,线棒绝缘层均匀性达97%,未优化前为88%,机组启停次数从日均2~3次提升至4~5次仍无疲劳开裂,维护周期从1 a延长至1.5 a。

4.2.3 脂环族环氧树脂CY-184复合增强及效果对比

机械性能提升上,与10%~15%聚氨酯(PU)预聚体共混,冲击强度从12 kJ/m²提升至20~25 kJ/m²^[17],弯曲强度从95 MPa提升至110~115 MPa,同时保持介电常数 ≤ 3.5 ,满足大型机组机械应力要求。

对于耐湿热优化上,表面接枝硅氧烷(如聚二甲基硅氧烷PDMS),吸水率从0.8%降至0.3%以下,90 °C/90% RH湿热环境下体积电阻率保持率从60%提升至85%,老化720 h后击穿场强保持率从81.6%提升至90%^[18]。

工程应用优化上,在某大型水电站辅助机组中应用复合增强CY-184,运行3 a绝缘性能保持率达92%,未优化样品同期保持率约80%,设备可用率提升5%。

4.3 不同工况下的选型成本决策表

中小型电站(≤ 300 MW)选双酚A型E-51,成本指数1,其低价(约30元/kg)和良好工艺性降低初期投入,适配低压、常温工况,虽长期维护成本较高,但适合成本敏感场景。抽水蓄能机组用酚醛型F-51,成本指数1.5,虽然原料和加工成本高于E-51,但高机械强度减少维护,综合更优。大型高压机组(≥ 700 MW)选脂环族CY-184,成本指数3,虽价高且加工复杂,但优异性能避免巨额停机损失。高温高湿环境用CY-184+PU共混体系,成本指数3.5,改性成本换耐湿热性,降低长期更换成本。

表4 选型成本决策表
Tab.4 Selection cost decision

应用场景	关键性能需求	推荐树脂类型	成本指数(以E-51为1)
中小型电站(≤ 300 MW)	低成本、工艺性	双酚A型E-51	1.0
抽水蓄能机组	高机械强度、抗冲击	酚醛型F-51	1.5
大型高压机组(≥ 700 MW)	高击穿场强、热稳定性	脂环族CY-184	3.0
高温高湿环境	耐湿热、低介电损耗	CY-184+PU 共混体系	3.5

5 结论

本研究系统分析了双酚A型环氧树脂E-51、酚醛环氧树脂F-51和脂环族环氧树脂CY-184的性能及应用。E-51因柔性醚键与刚性苯环结构,兼具柔韧性、良好工艺性和成本优势,但耐热及电绝缘性欠佳;F-51多官能团形成高度交联结构,机械强度高、耐热性较好,不过熔体黏度大影响工艺性;CY-184无苯环与极性基团,电绝缘和热稳定性优异,机械强度却较弱。

5.1 环氧树脂作为定子线棒绝缘材料的关键优势

3种环氧树脂均具备良好的电气绝缘性、粘接强度和成型工艺性,能满足不同功率等级水轮发电机的基本绝缘需求,应用占比超85%,可以体现出综合性能均衡;通过分子结构调控、填料改性、工艺优化等方式,可针对性提升导热性、耐老化性、机械强度等关键性能,适配多样化工况,可以体现出结构可设计性强:形成从低成本(E-51)、中成本(F-51)到高性能高成本(CY-184)的产品体系,能满足不同

预算和性能要求的工程场景,可以体现出成本梯度适配;经过长期实践验证,工艺适配性强,可与真空压力浸漆、多胶模压等主流加工工艺匹配,运行可靠性高,可以体现出工程应用成熟。

5.2 环氧树脂作为定子线棒绝缘材料的性能短板

(1) 单一性能存在瓶颈: E-51 耐热性和耐老化性不足, F-51 黏度高、工艺窗口窄, CY-184 机械强度偏低,难以同时满足大型高压机组对各项性能的严苛要求;

(2) 极端环境适应性有限: 在高海拔低气压、高温高湿等极端环境下,未改性环氧树脂易出现击穿、老化加速等问题;

(3) 改性存在协同难题: 部分改性手段会导致其他性能下降,如 F-51 韧性提升后耐热性略有降低, E-51 添加填料后工艺性变差;

(4) 长期老化性能有待提升: 在长期高温、湿热循环工况下,3 种环氧树脂均存在性能退化现象,尤其是双酚 A 型 E-51 退化更为明显。

5.3 改进方向

从分子设计优化上,开发新型多官能团环氧树脂,兼顾低黏度、高交联密度和低极性,从根源上解决单一性能瓶颈;

从复合改性技术创新上,采用“纳米填料+有机改性剂”复合体系,实现导热性、耐老化性、机械强度的协同提升,避免单一改性的性能短板;

从极端环境适配技术上,针对高海拔、高温高湿等场景,开发专用改性配方,提升材料在低气压下的击穿场强和湿热环境下的稳定性;

从长效寿命提升研究上,深入研究环氧树脂老化机理,开发抗老化添加剂和自修复体系,延长绝缘材料的使用寿命,降低维护成本;

从工艺-性能一体化优化上,建立材料性能与加工工艺的关联模型,优化固化工艺、浸渍工艺参数,在保障性能的同时提升生产效率。

通过本研究可以看出,不同类型的环氧树脂在性能上各有优劣,在实际应用中需要根据具体的工况和性能需求进行科学选型。同时,通过改性和工艺优化,可以进一步提升环氧树脂的性能,扩大其应用范围。未来的研究方向可以聚焦于开发具有更高综合性能的环氧树脂,如同时具备优异的耐热性、电绝缘性、机械性能和工艺性能的新型环氧树脂,以满足水轮发电机向更大容量、更高参数发展的需求。此外,还可以研究环氧树脂在极端环境下的性能变化规律,为其在特殊场合的应用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 卫魏,罗红英,余权威,等.西藏水电能源开发问题分析[J].高原农业,2021,5(3):301-308.
- [2] 李浩,齐腾岳,贾蒲云,等.高海拔地区导叶开角对混流式水轮机效能影响初探[J].高原农业,2024,8(2):217-223.
- [3] 任烁,罗红英,杜运鑫等.高原环境下混流式水轮机空化特性及对压力脉动的影响[J].高原农业,2025,9(2):249-256.
- [4] 张成平,覃大清,张春生等.百万千瓦水轮发电机组关键技术研究及应用[Z].中国三峡建工(集团)有限公司.2023.
- [5] IEEE. IEEE Guide for Temperature Limits in the Rating of Rotating Electrical Machines: IEEE Std 117-2016[S]. IEEE, 2016
- [6] 曹文斌.环氧树脂绝缘件在电力设备中的应用[J].电气制造,2009(12):28-29.
- [7] ASTM D3418-15. Standard Test Method for Glass Transition Temperature by Differential Scanning Calorimetry [S]. 2015.
- [8] 欧雄燕.联苯酚醛环氧树脂的合成与性能[D].长沙:湖南大学,2008.

- [9] 江苏泰特新材料科技股份有限公司. 一种脂环族环氧树脂的合成方法:CN202210756920.0[P]. 2025-03-18.
- [10] 许雯,和莉颖,陈宇迪,等. 差示扫描量热法(DSC)测量聚丙烯熔融温度的不确定度评定及测量影响因素分析[J]. 分析仪器, 2026,(4):183-187.
- [11] 谢启源,陈丹丹,丁延伟. 热重分析技术及其在分子表征中的应用[J]. 高分子学报,2022,53(2):193-210.
- [12] 李璋琪,黄频波,牛慕琦. 改性双酚A型环氧树脂耐热性能提升研究[J]. 云南化工,2023,50(6):52-55.
- [13] 柴云,刘祥萱,王焯军,等. 改性酚醛环氧树脂F-51自修复微胶囊的制备[J]. 表面技术,2016,45(10):141-147.
- [14] 陈浩,田正波,张阳等. 植物油改性脂环族环氧树脂绝缘复合材料[J]. 材料科学与工程学报,2025,43(2):210-216.
- [15] 张翼,陈宏毅,虞鑫海. 新型环境友好型环氧胶粘剂的制备与性能研究[J]. 中国胶粘剂,2025,34(1):46-51,70.
- [16] 黄笔武,陈经伟,陈亚丽. 一种高性能紫外光固化涂料的制备与性能[J]. 南昌大学学报(工科版),2017,39(3):213-218.
- [17] 禹欣涛. 有机硅改性PU/DCPDE互穿聚合物网络材料的制备、结构与性能[D]. 郑州:郑州大学,2012.
- [18] 邱琪浩. 耐湿热环氧树脂基体的制备与性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.

~~~~~

上接478页

- [11] 王超,薛蓓,刘振东,等. 西藏野生藏杏果实品质质量评价[J]. 食品科技,2015,40(09):87-91.
- [12] 屈燕飞,吴彩萍,陈学林,等. 甘肃杏属新分布种藏杏[J]. 北方园艺,2010,(03):206-207.
- [13] 庞鑫,张萌,石松林,等. 近65年来四川红杉径向生长对气候变暖的响应[J]. 应用与环境生物学报,2021,27(03):568-576.
- [14] 刘清华. 核桃种子萌发及苗期生长特性研究[D]. 济南:山东师范大学,2011.
- [15] 孟新法. 赤霉素和种皮对桃种子萌发和实生苗生长的影响[J]. 北京农业大学学报,1987,(04):463-466.
- [16] 贾彩霞. 核桃种子内源抑制物质的初步研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2006.
- [17] 段义忠,杜忠毓,王建武,等. 不同处理方法对长柄扁桃种子萌发的影响[J]. 陕西农业科学,2018,64(10):12-16.
- [18] 徐慧敏. 桃砧木种子萌发特性研究[D]. 南京:南京农业大学,2021.
- [19] Himanen K, Lilja A, Rytkönen A, et al. Soaking effects on seed germination and fungal infection in *Picea Abies*[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*,2013,28(1):41-821.
- [20] 周志琼,包维楷. 蔷薇种子的休眠及解除方法[J]. 热带亚热带植物学报,2009,(6):621-628.