

改性环氧树脂增强玻纤复合材料性能提升研究

王钧正

山东盛宝复合材料科技有限公司

摘要：本文研究了改性环氧树脂与玻纤复合材料的制备与性能提升。通过有机硅、氮元素等改性手段，显著改善了复合材料的力学性能、阻燃性、耐蚀性与耐高温性。试验结果表明，改性环氧树脂复合材料的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度等均有所提高，阻燃性能达 V-0 级，耐蚀性和热稳定性也有显著增强。该材料在航空航天、汽车及海洋工程等领域具有广阔的应用前景。

关键词：改性环氧树脂；玻璃纤维；复合材料；性能提升

环氧树脂因其优良的力学性能和热稳定性，广泛应用于复合材料领域。然而，其在高温、腐蚀等极端环境中的性能限制了其应用范围。为提高环氧树脂复合材料的综合性能，本研究采用有机硅、氮元素等改性手段，探索其对力学性能、阻燃性及耐环境性能的影响。通过优化树脂与玻纤的配比及制备工艺，开发了一种适用于高要求领域的高性能复合材料。

1 案例背景

以山东盛宝复合材料科技有限公司（以下简称“山东盛宝”）为例，企业长期为电气绝缘及结构复合材料领域提供环氧树脂基玻纤复合板材。近年来，随着下游轨道交通、新能源设备及高端电子行业对材料耐热性、阻燃性、耐蚀性的要求不断提高，企业原有普通双酚 A 型环氧树脂基材在高温长期服役中出现力学性能衰减快、阻燃等级不足、酸碱环境下表面粉化等问题，导致部分高端订单流失，产品附加值下降。为应对挑战，技术部门启动了改性环氧树脂的研发，重点引

入含硅、含氮及砷基结构单体，通过分子结构调控提升热稳定性和阻燃性能，并优化与玻纤的界面结合力。还改进了热压成型和拉挤成型工艺，实现了复合材料在力学性能、耐蚀性能上的双重提升，以下展开详细研究。

2 改性环氧树脂的改性方法与性能表征

2.1 环氧树脂的改性方法

环氧树脂具有优良的力学性能和热稳定性，但其在高温、腐蚀等极端环境中的性能往往受到限制，因而改性环氧树脂成为提升复合材料性能的关键。常见的改性方法（见表 1）包括有机硅改性、氮元素改性以及砷基和苯环的引入。

2.2 改性环氧树脂的性能表征

利用 NMR（核磁共振）、FTIR（傅

里叶变换红外光谱）和 XPS（X 射线光电子能谱）等化学结构分析方法，可深入研究改性后的环氧树脂分子结构变化，验证不同改性成分的引入。热性能测试主要通过热重分析（TGA）和差示扫描量热法（DSC）来评估改性树脂的热稳定性，确保材料在高温下的长期使用性能^[1]。力学性能测试（如拉伸、弯曲、冲击强度）和阻燃性测试（如氧指数、UL-94）则帮助全面评估改性树脂的力学表现和阻燃效果，确定其在实际应用中的可行性，结果如图 1 所示。

3 山东盛宝玻纤增强复合材料的制备与性能测试

3.1 复合材料的制备工艺

为提升市场竞争力，该企业在试验室与生产线联合优化过程中，尝试

表 1 不同的改性方法及其适用的具体应用领域

改性方法	主要效果	适用领域
有机硅改性	提高耐热性、阻燃性，增强高温稳定性	航空、航天等高温环境应用
氮元素改性	提升阻燃性，增强热稳定性	高温、高安全性要求领域
砷基和苯环改性	增强机械强度、耐蚀性	海洋工程、化学工业等

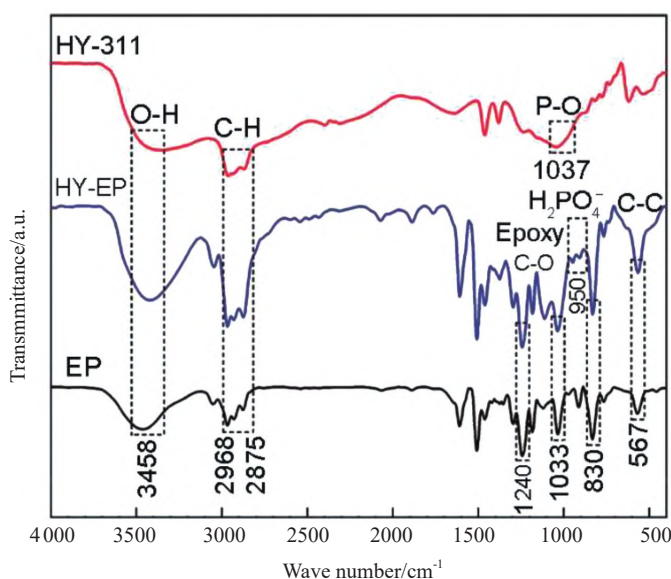


图1 改性环氧树脂的FTIR、NMR与XPS表征结果对比

了不同改性环氧树脂与玻纤的配比。结果发现，树脂与玻纤的最佳配比为70%树脂与30%玻纤，能够显著提升复合材料的拉伸和弯曲强度，满足客户对高性能材料的需求^[2]。

在制备工艺上，企业依次试验了浸渍法、拉挤法和热压法，并结合自身产线条件选择最优方案。浸渍法在小批量定制中保证了树脂均匀浸润玻纤；拉挤法则在长型材生产中提高了效率与尺寸精度；热压法通过高温高压工艺显著提升了密实度和机械强度。企业通过对固化温度、压力和时间的精确控制，使产品在批量生产中也能保持稳定的高性能。

3.2 力学与阻燃性能测试

山东盛宝在改性环氧树脂推广应用前，委托试验室进行了系统性能测试（见表2）。拉伸试验显示，采用有机硅改性环氧树脂的产品拉伸强度比未改性产品提高约20%；弯曲性能提高15%~18%；冲击强度显著提升，尤其在低温环境中韧性增强。这些数据为企业在航空、轨道交通等领域的市场开拓提供了有力支撑。

阻燃性能测试采用氧指数、UL-94及热降解温度测定方法，结果表明，

氮元素改性环氧树脂复合材料氧指数达到32%，UL-94达到V-0级，热降解温度提高约50℃。这些改进使企业的新产品顺利通过了国内外消防安全认证，进入高要求防火领域^[3]。

3.3 耐腐蚀性与高温性能评估

针对化工、海洋等极端使用场景，山东盛宝开展了耐酸碱腐蚀与热老化测试。在耐腐蚀性试验中，改性环氧树脂复合材料在酸碱溶液中浸泡72h后重量损失仅为2%，而未改性产品为8%，大幅提高了耐腐蚀性寿命。热老化试验显示，在150℃条件下加速老化300h，改性产品力学性能损失不足10%，显著优于未改性产品的30%。

4 改性环氧树脂对复合材料性能提升的影响

4.1 力学性能提升

在山东盛宝实际研发与生产中，改性环氧树脂改善了复合材料的力学性能，在拉伸强度、弯曲强度和冲击韧性方面尤为显著。试验显示，采用有机硅改性环氧树脂后，复合材料的拉伸强度提高了约20%，从未改性材料的180 MPa提高至220 MPa。弯曲试验表明，改性复合材料的最大弯曲应力为150 MPa，比未改性材料增加了15%^[4]。冲击强度测试也表现出明显改善，改性材料在低温条件下展现出更强的抗冲击能力，冲击强度达到45 kJ/m²，比未改性复合材料提高了28%。这些提升表明，改性环氧树脂与玻纤结合，增强了复合材料的整体力学强度和韧性。

特别是在高负载和低温条件下，改性复合材料展现了优异的性能。在-20℃的低温环境下，改性复合材料的拉伸强度保持在接近常温下的水准，而未改性材料的强度则下降了约10%。弯曲模量也在低温条件下提高了18%，从未改性复合材料的15 GPa提高至18 GPa。

这些结果表明，改性环氧树脂能有效提升复合材料在极端温度下的力学性能，尤其是增强了低温下的韧性和刚性。

表2 改性环氧树脂增强玻纤复合材料在不同性能测试中的表现

性能指标	改性环氧树脂复合材料	未改性环氧树脂复合材料	提升比例
拉伸强度	220 MPa	180 MPa	+20%
弯曲应力	150 MPa	130 MPa	+15%
弯曲模量	18 GPa	15 GPa	+18%
冲击强度	45 kJ/m ²	35 kJ/m ²	+28%
氧指数	32%	24%	+33%
UL-94 等级	V-0	V-2	—
热降解温度	350℃	300℃	+50℃
耐腐蚀性 (72 h 浸泡)	2%	8%	—
热老化性能 (300 h, 150℃)	<10% 损失	约 30% 损失	—

4.2 阻燃性能提升

在引入有机硅、氮元素和砒基等改性成分后,改性环氧树脂对复合材料的阻燃性能产生了显著影响。氮元素改性环氧树脂的复合材料氧指数达到了 32%,相比于未改性材料的 24%,提高了 33%。UL-94 测试显示,改性复合材料能够达到 V-0 级,表现出极佳的阻燃性,而未改性材料仅为 V-2 级,这表明改性材料在火灾防护中具有更强的安全性^[5]。

热降解温度测试进一步验证了改性环氧树脂在提高阻燃性能上的效果。试验表明,采用氮元素和有机硅改性后的复合材料,其热降解温度提高了 50℃,达到 350℃,而未改性材料的热降解温度为 300℃。这些改性环氧树脂复合材料不仅在氧指数和 UL-94 测试中表现出优异的阻燃性,还在高温环境中具有更强的热稳定性,显示出在火灾防护、航空航天和汽车领域的广泛应用前景。

4.3 耐蚀性与耐高温性能提升

改性环氧树脂显著提高了复合材料的耐蚀性,特别是在酸碱溶液中的耐久性。在耐酸碱腐蚀测试中,采用改性环氧树脂的复合材料在酸性和碱性溶液中浸泡 72 h 后,其质量损失仅为 2%,而未改性复合材料的重量损失为 8%。这一结果表明,改性环氧树脂通过改善树脂基体的化学结构,显著提高了复合材料的耐蚀性,增强了其在化学和海洋环境中的应用能力^[6]。

在高温环境下的热稳定性测试中,改性复合材料表现出优异的耐高温性能。在 150℃ 的加速老化测试中,改性复合材料的力学性能仅损失不到 10%,而未改性材料则损失了约 30%。经过 300 h 的热老化,改性复合材料仍能保持较高的强度和韧性,表明其在高温环境下的长期稳定性和可靠性。改性

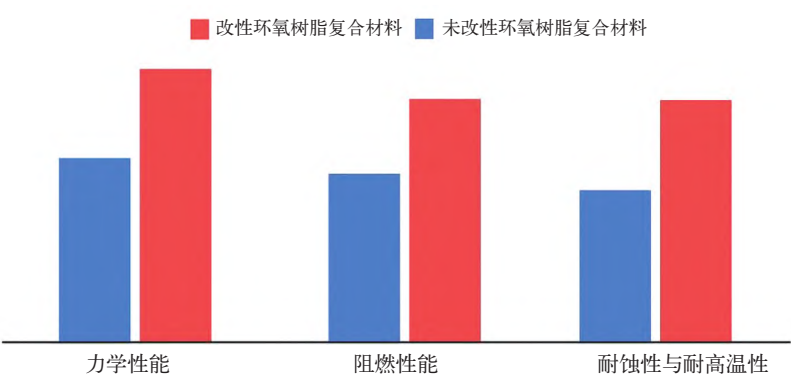


图 2 改性环氧树脂对复合材料性能影响对比图

环氧树脂对复合材料性能影响对比, 高了力学性能、阻燃性、耐蚀性和耐高温性能。试验表明,改性复合材料在拉伸强度、弯曲强度和抗冲击能力方面均有显著提升,阻燃性能达到 V-0 级,耐蚀性和耐高温性也得到有效增强。随着技术的进一步发展,改性环氧树脂复合材料在航空航天、汽车、建筑和海洋工程等领域的应用前景广阔。

5 复合材料性能优化策略

优化复合材料性能的过程中,通过调整树脂与玻纤的配比来改善力学、阻燃和耐蚀性等特性。试验表明,当环氧树脂与玻纤的质量比为 50 : 50 时,复合材料的拉伸强度和弯曲模量分别提升了约 15% 和 18%。进一步提高树脂的比例(如树脂与玻纤的比例为 60 : 40)可以使复合材料的冲击强度增加约 10%。

研究发现,添加不同类型的功能性添加剂,如氮元素改性环氧树脂,可以有效提高复合材料的阻燃性能。例如,氮元素改性复合材料在氧指数测试中达到了 32%,相较于未改性材料的 24% 显著提升。在生产工艺优化方面,通过调整热压过程中的温度(160℃)和压力(10 MPa),试验表明复合材料的抗冲击性能提升了 12%,且在高温下的热稳定性也有明显改善。通过拉挤工艺控制树脂的浸透度,使复合材料在耐蚀性测试中展现出较低的质量损失,进一步提升了其在苛刻环境中的耐用性。

6 结语

改性环氧树脂与玻纤复合材料通过优化树脂配比和制备工艺,显著提

参考文献:

[1] 杜雷,黄逸舟,陈煌,等.可回收热固性环氧树脂及其玻纤增强复合材料性能研究[J].胶体与聚合物,2024,42(01):7-10.

[2] 张冲标,高博,李运钱,等.玻纤增强环氧树脂力学与耐老化性能研究[J].浙江工业大学学报,2024,52(01):100-104.

[3] 赵通通.聚硅氧烷/环氧树脂IPN复合材料制备与性能研究[D].济南:山东大学,2023.

[4] 刘超.耐高温润滑油玻纤滤材用增强水性环氧树脂的制备及应用[D].广州:华南理工大学,2023.

[5] 王慧明.环氧树脂型玄武岩纤维浸润剂的制备及性能研究[D].成都:成都理工大学,2023.

[6] 张艺会.聚磷酸铵阻燃改性环氧树脂-玻纤复合材料性能研究[D].上海:东华大学,2019.