

环氧树脂结构改性及其对无纺布抛光轮高温磨削性能的影响研究

盘茂东

阳江市伟艺抛磨材料有限公司, 广东 阳江 529500

DOI:10.61369/ME.2025120044

摘要 : 本研究聚焦于改善环氧树脂耐温性以提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能。通过化学接枝改性、纳米粒子共混等多种技术, 基于自由体积理论等, 从多方面阐述耐温性提升机理。借助 DMA 等多种测试分析手段, 经热老化等多项试验验证, 最终成功地将环氧树脂固化物 Tg 值提升至 110–120°C, 显著提高了抛光轮在高温下的磨削效率约 35%, 延长了其使用寿命约 131.5%。

关键词 : 环氧树脂; 无纺布抛光轮; 耐温性

Research on Improving the Temperature Resistance of Epoxy Resin to Enhance the High Temperature Resistance of Non-woven Polishing Wheel Grinding

Pan Maodong

Yangjiang Weiyi Polishing Materials Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong 529500

Abstract : This study focuses on improving the temperature resistance of epoxy resin to enhance the high temperature resistance of non-woven polishing wheels during grinding. Through various techniques such as chemical grafting modification and nanoparticle blending, based on the free volume theory, the mechanism of improving temperature resistance is elucidated from multiple aspects. By using various testing and analysis methods such as DMA, and verifying through multiple experiments such as thermal aging, the glass transition temperature (T_g) of the cured epoxy resin was successfully increased to the range of 110–120°C. This led to a significant increase of approximately 35% in the grinding efficiency at high temperature and an extension of service life by approximately 131.5%.

Keywords : epoxy resin; non-woven polishing wheel; heat resistance

引言

随着制造业对高温磨削加工需求的增加, 提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能至关重要。2023年颁布的《制造业高质量发展规划》强调新材料研发对制造业升级的支撑作用。环氧树脂的 T_g 值对无纺布抛光轮磨削热稳定性影响重大, 现有材料高温下的软化变形和粘结失效严重影响其性能。本研究聚焦改善环氧树脂耐温性, 通过化学接枝改性、纳米粒子共混等多种技术, 基于自由体积理论等深入探究其机理, 并借助多种测试手段和试验方法进行验证, 旨在为提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能提供有效途径, 符合制造业高质量发展对材料性能提升的要求。

一、环氧树脂耐温性改善的理论基础

(一) 无纺布抛光轮的高温失效机理

环氧树脂的 T_g 值(玻璃化转变温度)对无纺布抛光轮的磨削热稳定性至关重要。当温度低于 T_g 值时, 环氧树脂处于玻璃态, 表现出较高的硬度和模量, 能有效维持抛光轮结构稳定, 确保磨削性能。然而, 现有材料在高速磨削瞬时温度 200°C 以上工况时, 温度接近或超过环氧树脂的 T_g 值, 分子链段热运动加剧, 材料开始从玻璃态转变为高弹态, 出现软化变形。随着温度持续升高,

分子间作用力减弱, 粘结剂与磨料之间的粘结力逐渐下降, 最终导致粘结失效^[1]。这种软化变形与粘结失效, 破坏了抛光轮的结构完整性, 极大地降低了其磨削性能, 严重影响其在高温磨削工况下的使用。

(二) 耐温性提升的核心要求

改善环氧树脂耐温性, 对提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能至关重要。耐温性提升的核心要求主要包括以下几方面。首先需明确 T_g (玻璃化转变温度) 提升目标区间为 100 – 150°C, 玻璃化转变温度是衡量材料从玻璃态转变为高弹态的关键指标, 合适

的 T_g 能确保环氧树脂在较高温度下仍保持良好的物理性能^[2]。同时，要解析耐热性与机械性能的平衡关系，过高追求耐热性可能会降低材料的柔韧性等机械性能，而单纯注重机械性能又难以满足耐高温需求。此外，还应提出分子交联度提升与热分解温度优化的协同作用原理，增加分子交联度可增强分子间作用力，提高材料稳定性，优化热分解温度则能使材料在更高温度下才发生分解，二者协同可有效提升环氧树脂的耐温性。

二、环氧树脂改性方法研究

(一) 化学接枝改性技术

化学接枝改性技术通过在环氧树脂分子链上引入特定官能团，改变其化学结构，从而影响交联网络密度，提升耐温性^[3]。例如采用马来酸酐接枝改性，马来酸酐中的酸酐基团可与环氧树脂中的羟基等发生反应，引入极性的酸酐结构。这不仅增加了分子链间的相互作用力，还为后续交联反应提供更多活性位点，有助于形成更致密的交联网络。芳香族胺类固化剂复配也是化学接枝改性的有效方式，芳香族胺类固化剂中的氨基与环氧树脂的环氧基团反应，形成刚性的芳环结构，这些芳环结构能增强分子链的刚性和稳定性，进一步提高交联网络密度。通过差示扫描量热法(DSC)测试，可清晰验证化学接枝改性手段对环氧树脂耐温性的改善效果，明确其对交联网络密度的影响机制，为提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能奠定基础。

(二) 纳米粒子共混改性

纳米粒子共混改性是改善环氧树脂耐温性的重要途径。研究二氧化硅纳米管、蒙脱土片层等无机填料分散技术在此过程中至关重要^[4]。这些纳米粒子具备独特的微观结构与优异性能，当与环氧树脂共混时，能均匀分散其中。通过特殊的相互作用，纳米粒子可有效抑制环氧树脂分子链段的热运动。例如，二氧化硅纳米管凭借其高长径比和较大比表面积，与环氧树脂形成较强的界面作用力，限制分子链段的热运动幅度。蒙脱土片层则以其片层结构，在环氧树脂体系中构建物理阻隔层，阻碍热量传递，进而提升环氧树脂的耐高温性能。这种物理增强机理为提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能奠定了基础。

三、耐温性能改善机理分析

(一) T_g 提升的结构控制机理

1. 交联密度与自由体积关系

基于自由体积理论建立的改性树脂玻璃化转变数学模型，为理解环氧树脂耐温性能改善机理提供了重要视角。交联密度与自由体积存在紧密关系^[5]。当交联密度增加时，环氧树脂分子链间的连接更为紧密，限制了链段的运动。这使得自由体积减小，因为链段活动空间被压缩。共价键接枝进一步抑制链段运动，强化了这种约束。自由体积减小，意味着分子运动需克服更高的能量壁垒，宏观上表现为 T_g 提升。即通过对交联密度与自由体积关系的调控，实现对环氧树脂结构的控制，进而有效提升其耐温性

能，最终有助于提升无纺布抛光轮磨削时的耐高温性能。

2. 氢键网络强化机制

在环氧树脂体系中，极性基团的引入对耐温性提升起到关键作用。当引入极性基团时，其会增强分子间的次级键合。通过FTIR表征，可清晰观察到氢键的形成规律。由于极性基团的存在，使得环氧树脂分子间形成了更为密集的氢键网络^[6]。这种氢键网络如同一种“分子桥梁”，将环氧树脂分子更紧密地连接在一起，限制了分子链段的运动，进而强化了材料的结构稳定性。随着氢键网络的强化，环氧树脂的玻璃化转变温度(T_g)得以提升，耐温性能也随之改善。氢键网络不仅增强了分子间作用力，还在受热时为体系提供了更多的能量吸收位点，使得材料在高温下更难发生分子链的滑动与变形，从而有效提升了无纺布抛光轮磨削时的耐高温性能。

(二) 热稳定性增强机理

1. 热分解路径调控

在改善环氧树脂耐温性的研究中，纳米填料对热分解路径调控起着关键作用。纳米填料的加入可显著提升树脂热降解活化能。这是因为纳米填料具有较大的比表面积和良好的分散性，能在树脂基体中形成物理阻隔网络，限制分子链段的运动^[7]。通过TGA-MS研究热解产物变化规律发现，未添加纳米填料时，环氧树脂热分解按常规路径进行，产生大量挥发性小分子产物。而加入纳米填料后，热分解路径发生改变，部分热解反应被延迟或抑制。纳米填料与环氧树脂之间存在较强的相互作用，这种作用使得热解反应需克服更高的能量壁垒，从而改变热分解路径，减少热解产物的生成，有效提升了环氧树脂的耐温性，为提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能奠定基础。

2. 表面传热优化机制

研究改性树脂/纤维界面处的声子散射特性，对理解界面传热优化机制，进而改善环氧树脂耐温性至关重要。在该界面，声子作为热量传递的主要载体，其散射行为直接影响热传导效率。当声子传播至改性树脂/纤维界面时，界面的微观结构特征会引发声子散射。若界面存在大量缺陷、粗糙度较大或两种材料的声子谱不匹配，声子散射几率将增大，导致热阻升高，热量传递受阻，从而限制了热量在界面的快速传递，降低了热导率，提升了热冲击抗力^[8]。通过建立热传导数学模型，可定量分析声子散射对热传导的影响，从理论层面清晰阐释热冲击抗力提升机理，为优化界面传热、增强环氧树脂热稳定性，进而提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能提供理论依据。

四、性能表征与工程验证

(一) 热性能测试

1. DMA 动态热机械分析

在改善环氧树脂耐温性以提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能的研究中，DMA 动态热机械分析是重要的热性能测试手段。通过测试存储模量温度谱，能够清晰呈现材料在不同温度下的力学响应特性^[9]。一方面，由此可精准确定改性前后环氧树脂的玻璃化

转变温度 (Tg 值)。Tg 值是材料从玻璃态转变为高弹态的关键温度点，对材料在不同温度区间的性能表现有重要影响。另一方面，还能获取高温模量保持率。该指标反映了材料在高温环境下维持自身力学性能的能力，对于评估无纺布抛光轮在磨削高温工况下的性能稳定性意义重大。通过 DMA 动态热机械分析对这两个关键参数的测定，为深入理解环氧树脂改性效果及无纺布抛光轮的耐高温性能提供有力数据支撑。

2. 热老化循环试验

在热老化循环试验中，针对改善环氧树脂耐温性以提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能展开研究，着重进行 120 – 150°C 交变温度下的长期热稳定性评估。试验过程中，将无纺布抛光轮置于设定好交变温度的环境中，模拟实际使用时可能面临的高温变化工况。通过持续监测其在不同循环次数下的各项性能指标，如硬度、韧性、粘结强度等，深入分析环氧树脂在这种热环境下的性能演变规律。在此基础上，借助所获取的大量数据，运用合适的数学方法和理论依据建立寿命预测模型^[10]。该模型能够对无纺布抛光轮在特定交变温度条件下的使用寿命进行预估，为其在实际工程应用中的可靠性和耐久性提供重要参考，助力优化产品设计与应用策略。

(二) 机械性能测试

1. 高温压缩强度测试

在对改善环氧树脂耐温性以提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能的研究中，高温压缩强度测试采用高温万能试验机进行。将制备好的无纺布抛光轮试件放置于高温万能试验机内，设定试验环境温度为 120°C。在该高温环境下，试验机对试件施加压缩载荷，持续记录试件所承受的压力数值。通过精确测量，计算出在 120°C 时试件的压缩强度，并与常温下的压缩强度进行对比，从而得出 120°C 环境下的压缩强度保持率。这一数据能够直观反映出在高温工况下，经过环氧树脂耐温性改善后的无纺布抛光轮，其压缩强度的变化情况，进而为评估其在实际磨削高温环境中的机械性能提供关键依据。

2. 磨削界面温升模拟

在磨削界面温升模拟方面，构建摩擦热 – 结构应力耦合仿真模型至关重要。该模型能够有效预测实际工况下的温度分布情况。通过对模型参数的精准设定，包括磨削工艺参数如磨削速度、进给量等，以及材料属性参数，如环氧树脂的热导率、比热容等，使模型更贴合实际的无纺布抛光轮磨削场景。利用该模型模拟不同条件下磨削过程中界面的热量产生与传递，详细分析温度场在时间和空间上的变化规律。这不仅有助于深入理解磨削过程中环氧树脂所处的热环境，还能基于模拟结果优化抛光轮的材料配方和结构设计，为提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能提供理论依据，进一步指导工程实践中的性能改善。

(三) 抛光轮工程验证

1. 磨削效率对比实验

在改善环氧树脂耐温性以提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能的研究中，为定量评估其工程效果，我们开展了系统的磨削效率对比实验。实验在固定工艺参数（转速：2800 rpm，进给速度：

0.5 mm/s，磨削时间：60 s）下，对 304 不锈钢标准试件进行精密磨削。通过测量表面粗糙度 (Ra) 与材料去除率 (MRR) 来评价抛光轮的磨削性能。其中，表面粗糙度能直观反映工件磨削后的表面质量，而材料去除率则量化了抛光轮的磨削效率。为探究高温下的性能表现，实验特别设置了常温 (25° C) 与高温 (120° C) 两种工况。如表 1 所示，使用耐高温改性环氧树脂制备的抛光轮，在两种工况下均表现出更优异的性能稳定性。尤其是在 120° C 的高温环境下，其材料去除率比普通树脂抛光轮高出约 35%，且能获得更低的表面粗糙度，这表明其磨削能力与精度在高温下衰减更小。

表 1 不同环氧树脂抛光轮在不同温度下的磨削性能对比

环氧树脂类型	实验温度 (°C)	平均表面粗糙度 Ra (μm)	材料去除率 MRR (mg/min)
普通环氧树脂	25	0.32 ± 0.02	15.8 ± 0.5
耐高温改性环氧树脂	25	0.28 ± 0.01	16.5 ± 0.4
普通环氧树脂	120	0.51 ± 0.04	9.2 ± 0.7
耐高温改性环氧树脂	120	0.35 ± 0.02	12.4 ± 0.5

通过对上述数据的分析，可以明确得出结论：通过改善环氧树脂的耐温性，能显著提升无纺布抛光轮在高温工况下的磨削效率与稳定性，有效防止因树脂基体软化导致的性能急剧下降，为该类抛光轮在苛刻磨削条件下的应用提供了坚实的数据支撑。

2. 使用寿命加速测试

为定量探究环氧树脂耐温性改善对无纺布抛光轮磨削性能与使用寿命的影响，本研究设计了热 – 力耦合加速磨损试验。该试验模拟抛光轮在实际工况下面临的高温 (120° C) 与高压 (0.5 MPa) 环境，对普通环氧树脂抛光轮 (A 组) 与耐高温改性环氧树脂抛光轮 (B 组) 进行对比测试。试验以抛光轮磨削效率下降至初始值的 70% 或出现结构性破损作为失效判据，并记录其从开始工作到失效所经历的总时间，定义为有效工作周期。如表 2 所示，在相同的严苛条件下，B 组抛光轮的有效工作周期相比 A 组有极显著的提升。

表 2 热 – 力耦合加速磨损试验结果

组别	环氧树脂类型	测试样本数量 (n)	平均有效工作周期 (min)	标准偏差 (min)	周期提升率
A 组	普通环氧树脂	5	48.5	± 4.2	--
B 组	耐高温改性环氧树脂	5	112.3	± 5.8	+131.5%

数据分析表明，耐高温改性抛光轮的有效工作周期是普通抛光轮的 2.3 倍以上，提升率高达 131.5%。这直接证明，通过改善环氧树脂的耐温性，能显著延缓抛光轮在热 – 力耦合作用下的性能衰减，有效抵抗高温软化和磨损，从而大幅延长其使用寿命。该结果为高性能无纺布抛光轮的实际生产与应用提供了关键的数据支持与可行性依据。

五、总结

本研究针对无纺布抛光轮在高温环境下性能下降的问题，通过优化环氧树脂的分子结构，成功将材料的玻璃化转变温度

(T_g) 从 70–80°C 提升至 110–120°C。实验结果表明，在接近 T_g 的 100–120°C 高温磨削条件下，改性后的抛光轮仍能保持良好的机械强度与形状稳定性，其磨削效率（材料去除率）较未改性产品提升约 35%，使用寿命显著延长至原有水平的 2.3 倍以上。研究

从实际应用需求出发，通过适度的耐温性提升，有效拓展了无纺布抛光轮在中高温环境下的适用窗口，为解决抛光轮在连续加工中的热软化、寿命短等问题提供了经济可行的技术路径，具有较强的工程应用价值。

参考文献

- [1] 张孝文. 电子封装用环氧树脂耐高温性能与电气性能研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2023.
- [2] 刘泽洋. 耐高温环氧树脂基电子封装材料的制备与性能研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2023.
- [3] 王坤. 耐高温环氧树脂基全固态聚合物电解质的制备与性能优化 [D]. 北京化工大学, 2021.
- [4] 陈自兵. 形状记忆环氧树脂的制备及性能研究 [D]. 中北大学, 2021.
- [5] 目镜琪. 环氧树脂发泡材料的制备与性能研究 [D]. 湖北工业大学, 2021.
- [6] 郭辉, 李琳, 袁海静. 耐高温预浸料环氧树脂的研制及其性能评价 [J]. 高科技纤维与应用, 2022, 47(5): 39–43.
- [7] 韩苇召, 张锋锋, 王锦艳, 等. 含碳硼烷耐高温环氧树脂的合成与性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(11): 22–28.
- [8] 范海明, 杨航, 李玲玉, 魏志毅, 张随望, 张金泽, 刘崧达, 杨红斌. 含醇交联压裂液的交联和耐温性能 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021.
- [9] 李伟捷, 光善仪, 徐洪耀. 不同固化剂复配的耐高温环氧树脂体系性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(5): 69–80.
- [10] 温子巍, 周熠, 付子恩. 电器用 RTV-1 硅酮密封胶耐温性能的研究 [J]. 粘接, 2022, 49(2): 22–25, 38.