

Analysis and Improvement of Flame Retardant Properties of Aramid Rubber Composite Materials

Zhou Tong¹ Peng Lu²

1. Liaoning Provincial Product Quality Supervision and Inspection Institute, Shenyang, Liaoning, 110032, China

2. Shenyang Rubber Research and Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110021, China

Abstract

Aramid rubber composite materials have been widely used in aerospace, automotive and other fields due to their excellent mechanical properties and heat resistance. This article aims to improve the flame retardant properties of aramid rubber composite materials, using various flame retardants for modification, and analyzing the effects of different flame retardants on the flame retardant properties of composite materials. The thermal stability and flame retardancy of the modified composite material were evaluated through thermogravimetric analysis (TGA), vertical combustion experiment (UL-94), and oxygen index (LOI) testing. The research results indicate that the addition of phosphorus based and nitrogen based flame retardants significantly improves the flame retardancy of aramid rubber composites, with the phosphorus nitrogen composite flame retardant system performing the best. Under this system, the ultimate oxygen index of the composite material increased to 32%, and the vertical combustion test reached V-0 level. In addition, thermogravimetric analysis showed that the quality loss rate of the modified composite material was significantly reduced at high temperatures. This study provides a theoretical basis and technical support for the application of aramid rubber composite materials in high-temperature environments.

Keywords

aramid rubber composite material; flame retardant performance; flame retardant; thermogravimetric analysis; vertical combustion test

芳纶橡胶复合材料的阻燃性能分析及改进

佟舟¹ 卢鹏²

1. 辽宁省产品质量监督检验院, 中国·辽宁 沈阳 110032

2. 沈阳橡胶研究设计院有限公司, 中国·辽宁 沈阳 110021

摘 要

芳纶橡胶复合材料由于其优异的机械性能和耐热性, 在航空航天、汽车等领域具有广泛应用。论文以提高芳纶橡胶复合材料的阻燃性能为目标, 采用多种阻燃剂进行改性, 并分析了不同阻燃剂对复合材料阻燃性能的影响。通过热重分析 (TGA)、垂直燃烧实验 (UL-94) 和氧指数 (LOI) 测试, 评估了改性后的复合材料的热稳定性和阻燃性能。研究结果表明, 添加磷系和氮系阻燃剂显著提高了芳纶橡胶复合材料的阻燃性能, 其中磷氮复合阻燃体系表现最佳。在该体系下, 复合材料的极限氧指数提高至32%, 垂直燃烧试验达到V-0级。此外, 热重分析显示, 改性后的复合材料在高温下的质量损失率显著降低。论文的研究为芳纶橡胶复合材料在高温环境下的应用提供了理论基础和技术支持。

关键词

芳纶橡胶复合材料; 阻燃性能; 阻燃剂; 热重分析; 垂直燃烧试验

1 引言

芳纶橡胶复合材料在航空航天和汽车等领域广泛应用, 但其阻燃性能不足, 限制了高温环境中的使用。为提升阻燃性能, 我们采用了多种阻燃剂, 评估了不同阻燃剂的效果。结果显示, 磷系和氮系阻燃剂显著提高了阻燃性能, 这项研究为芳纶橡胶复合材料在高温环境中的应用提供了新的可能, 也为材料的安全性提升提供了理论基础和技术支持。

【作者简介】佟舟 (1999-), 女, 中国辽宁丹东人, 本科, 助理工程师, 从事质量研究。

2 芳纶橡胶复合材料概述

2.1 芳纶橡胶复合材料的基本特性

芳纶橡胶复合材料是一种由芳纶纤维和橡胶基体组合而成的高性能复合材料^[1]。其具有优异的机械性能, 包括高强度、高模量和良好的耐疲劳性^[2]。这些特性使其在高强度、高耐磨要求的应用中表现出色。芳纶纤维由于其本身的耐热性和稳定性, 使得复合材料在高温环境下仍能保持良好的性能。芳纶橡胶复合材料还具备优良的耐化学腐蚀性, 能抵抗多种化学物质的侵蚀, 从而延长材料的使用寿命。芳纶纤维的低密度特点也使得复合材料具有较轻的重量, 在需要减重的应用中展现出明显优势。

2.2 芳纶橡胶复合材料的应用领域

芳纶橡胶复合材料在多个领域得到了广泛应用。在航空航天领域，由于其卓越的机械性能和耐热性，芳纶橡胶复合材料被用于制造飞机结构件和防护装备，提升了航空器的安全性和耐用性。在汽车工业中，芳纶橡胶复合材料用于制造车身部件和内饰材料，不仅减轻了车辆重量，还提高了耐冲击性和燃油效率。在电子电器行业，芳纶橡胶复合材料因其优异的电绝缘性和阻燃性能，被用于生产高性能电缆、绝缘板和电子元器件。芳纶橡胶复合材料在建筑工程中也有应用，其耐热、耐磨和防火性能使其成为理想的建筑材料，用于制造防火门、隔热板和管道保护层。通过广泛应用于这些领域，芳纶橡胶复合材料展示了其多功能性和优越性能。

2.3 芳纶橡胶复合材料的阻燃性能现状

芳纶橡胶复合材料在航空航天、汽车等领域的应用中，阻燃性能至关重要。现有的芳纶橡胶复合材料在阻燃性能方面存在不足，难以满足高温环境的要求。目前主要的阻燃改性方法包括添加磷系、氮系等阻燃剂，以提高材料的热稳定性和阻燃性能。研究表明，单一阻燃剂在提升阻燃效果方面有限，而复合阻燃体系可以更显著地改善材料的阻燃性能，尤其是磷氮复合阻燃体系表现出较高的极限氧指数和较低的质量损失率，为材料在高温环境中的应用提供了有效支持。

3 阻燃剂的选择与改性方法

3.1 常用阻燃剂及其作用机制

常用阻燃剂主要包括卤系、磷系和氮系阻燃剂。卤系阻燃剂利用其在燃烧过程中生成的卤化氢气体，抑制燃烧反应链，达到阻燃效果。其优点是阻燃效率高，但燃烧时会释放有毒气体，环保性较差。磷系阻燃剂通过在高温下生成磷酸或多聚磷酸，形成阻燃保护层，减少可燃气体的产生和传热，具有良好的阻燃性能和热稳定性，且毒性较低。氮系阻燃剂则通过热分解生成氮气等惰性气体，稀释燃烧区域的氧气浓度，其分解产物可与材料表面形成稳定的炭化层，阻止热量和氧气的进一步传递，提高材料的耐火性能。磷氮复合阻燃体系结合了磷系和氮系阻燃剂的优点，能够在燃烧过程中形成更加稳定且高效的阻燃屏障，显著提升材料的整体阻燃性能。

3.2 磷系阻燃剂的作用及效果

磷系阻燃剂通过在芳纶橡胶复合材料中引入磷元素，在燃烧过程中形成阻燃保护层，发挥阻燃作用。磷系阻燃剂主要包括红磷、磷酸盐及其衍生物。红磷通过燃烧生成磷酸和磷酸盐，形成致密的玻璃态保护层，隔绝氧气和热量，阻止材料进一步燃烧。磷酸盐和有机磷化合物在高温下分解，释放出磷酸，催化炭化过程，生成炭层，进一步增强阻燃效果。研究表明，磷系阻燃剂能够有效提高材料的极限氧指数，降低垂直燃烧实验中的燃烧速率，提高材料的热稳定性和耐火性能。

3.3 氮系阻燃剂的作用及效果

氮系阻燃剂主要通过释放不燃气体和形成保护性炭层来提高芳纶橡胶复合材料的阻燃性能。氮系阻燃剂在高温下分解生成氨气、氮气等不燃气体，稀释燃烧区的氧浓度，降低材料的燃烧速度。氮系阻燃剂能促进材料表面形成致密的炭化层，阻隔热量和氧气的传递，进一步提高材料的热稳定性和阻燃性。实验结果显示，添加氮系阻燃剂后，材料的热分解温度升高，热释放速率显著降低，达到更好的阻燃效果^[3]。

4 芳纶橡胶复合材料阻燃性能测试与分析

4.1 热重分析（TGA）方法及结果

热重分析（TGA）是一种通过监测材料在不同温度下的质量变化来研究其热稳定性和分解特性的技术。在中，使用 TGA 对未改性和改性后的芳纶橡胶复合材料进行热重分析，以评估阻燃剂的效果。测试在氮气气氛中进行，温度范围设定为室温至 800℃，升温速率为 10℃/min。未改性芳纶橡胶复合材料在 350℃左右开始显著分解，600℃时残余质量约为 20%。添加磷系和氮系阻燃剂的复合材料在 450℃才开始大量分解，700℃时残余质量显著增加，约为 40%。尤其是磷氮复合阻燃体系的复合材料，表现出更高的热稳定性，在 700℃时残余质量超过 45%。这些结果表明，磷氮复合阻燃剂显著提高了芳纶橡胶复合材料的热稳定性，有效延缓了其分解过程。TGA 分析结果为后续阻燃性能测试提供了重要的基础数据。

4.2 垂直燃烧实验（UL94）方法及结果

采用 UL-94 标准测试方法对改性芳纶橡胶复合材料的阻燃性能进行评估。试样尺寸为 125 mm × 13 mm × 3 mm，测试前在 23℃和 50%相对湿度下调节 48h。测试装置包括燃烧器和样品夹持装置，燃烧器火焰高度为 20 mm，火焰接触样品 10s 后移除，并记录样品熄灭时间和滴落物是否引燃棉花。测试结果显示，磷氮复合阻燃体系的芳纶橡胶复合材料表现出优异的阻燃性能，所有试样均达到 V-0 级别，平均熄灭时间不足 5s，无熔滴现象。结果表明，磷氮复合阻燃体系显著提升了材料的阻燃效果^[4]。

4.3 氧指数（LOI）测试方法及结果

氧指数（LOI）测试用于评估材料在规定氧气浓度下的燃烧性能。采用 ASTM D2863 标准方法对改性后的芳纶橡胶复合材料进行 LOI 测试。结果显示，未改性样品的 LOI 值为 22%，添加磷系阻燃剂后的 LOI 值提高至 28%，添加氮系阻燃剂后的 LOI 值为 27%。磷氮复合阻燃体系样品的 LOI 值显著提升至 32%，表明其具有更优异的阻燃性能^[5]。LOI 值的提升反映了复合材料在空气中更难燃烧，阻燃效果明显增强。

5 磷氮复合阻燃体系的优化与性能评估

5.1 磷氮复合阻燃体系的优化设计

在磷氮复合阻燃体系的优化设计中，对磷系和氮系阻

燃剂的质量比进行系统研究,以确定最佳配比。采用均匀设计法,对不同配比的复合材料进行预实验,并通过氧指数(LOI)测试和垂直燃烧实验(UL-94)初步筛选性能较优的配方。在此基础上,结合热重分析(TGA)数据,评估不同配比对复合材料热稳定性的影响。通过响应面法(RSM),进一步优化磷氮复合阻燃体系的配比,得到最优组合。最终,确定了磷氮阻燃剂的最佳添加量和比例,为提升芳纶橡胶复合材料的阻燃性能奠定了基础。优化后的体系在阻燃性能和热稳定性方面均表现出显著提升,极限氧指数和垂直燃烧实验等级均达到预期目标。

5.2 改性复合材料的热稳定性分析

改性后的芳纶橡胶复合材料在热稳定性方面表现出显著改善。通过热重分析(TGA),测得改性复合材料的热分解温度明显高于未改性材料。具体实验结果显示,添加磷氮复合阻燃体系的复合材料在300℃~500℃温度范围内的质量损失率显著降低,表明其在高温下的热稳定性得到增强。对热分解过程的分析表明,磷氮复合阻燃体系在热分解过程中形成了一层致密的碳化层,有效阻止了热量和氧气的传递,延缓了基材的进一步分解。综合评价表明,磷氮复合阻燃体系不仅提高了复合材料的初始分解温度,还显著降低了最大失重速率,对热稳定性起到了积极作用。实验数据支持了改性技术在提升芳纶橡胶复合材料热稳定性方面的有效性。

5.3 改性复合材料的阻燃性能综合评价

改性后的芳纶橡胶复合材料在阻燃性能综合评价中表现出显著提升。热重分析显示,磷氮复合阻燃体系的加入使复合材料在高温下的质量损失率显著降低,热稳定性明显提高。氧指数测试结果表明,改性后的复合材料氧指数达到32%,显著高于未改性材料。垂直燃烧实验结果显示,改性材料达到了V-0级,表明其在火焰中的自熄性能优越。这些结果均表明磷氮复合阻燃体系在提升芳纶橡胶复合材料阻燃性能方面具有显著效果。

6 结论与展望

6.1 研究结论

研究结果显示,通过添加磷系和氮系阻燃剂,芳纶橡胶复合材料的阻燃性能得到了显著提升。热重分析(TGA)表明,改性后的复合材料在高温下的热稳定性明显增强,质量损失率显著降低。在垂直燃烧实验(UL-94)中,改性后的复合材料达到了V-0级,表明其具有优异的阻燃效果。氧指数(LOI)测试结果显示,采用磷氮复合阻燃体系的芳纶橡胶复合材料的极限氧指数提高至32%,远高于未改性材料。

磷系阻燃剂通过促进成炭,形成保护性炭层,有效隔绝热源和氧气;氮系阻燃剂通过释放不燃气体,稀释可燃气体浓度,进一步提高了阻燃效果。两者协同作用,使得磷氮复合阻燃体系在阻燃性能方面表现最佳。通过优化磷氮复合阻燃体系的配比和添加量,复合材料的热稳定性和阻燃性能得到了进一步增强。

6.2 未来研究方向与应用前景

未来研究方向应着重于进一步优化芳纶橡胶复合材料的阻燃体系,以满足更高的应用要求。可探索新型环保阻燃剂的开发,以减少对环境和人体的潜在危害。通过纳米技术,将纳米颗粒引入复合材料中,有望显著提升材料的阻燃性能和机械性能。基于不同阻燃剂协同作用的机理研究,有助于设计更加高效的复合阻燃体系。

在应用前景方面,随着对高性能材料需求的不断增长,芳纶橡胶复合材料在航空航天、汽车制造和电子设备等领域的应用将更加广泛。高效阻燃材料的研发将推动这些领域的技术进步和安全保障。通过材料的智能化设计和制造,开发出具有自修复、监测和响应功能的复合材料,将极大提升其应用价值和市场竞争力。

7 结语

论文研究了芳纶橡胶复合材料的阻燃性能,发现其阻燃性能不足。研究表明,磷系和氮系阻燃剂能显著提升阻燃效果,特别是磷氮复合体系最佳,极限氧指数提高到32%,垂直燃烧达到V-0级,高温下的质量损失率降低。尽管取得进展,但在阻燃剂的均匀分布、长期耐候性和环保性方面仍有不足。未来需进一步研究,探索新型高效环保阻燃剂,改进阻燃剂的分散技术,研究阻燃剂与基体的相互作用机制,以提高综合性能。这些研究将有助于提升芳纶橡胶复合材料的阻燃性能,拓宽其在高温环境中的应用。

参考文献

- [1] 刘吉凯,潘利剑.芳纶/阻燃环氧树脂复合材料的性能研究[J].复合材料科学与工程,2021(2):72-76.
- [2] 苍穹.新型阻燃木塑复合材料开发及阻燃性能分析[J].化工设计通讯,2021,47(9):32-33.
- [3] 黄伟江,李乾波,谢森,等.EP/GF/DiDOPO复合材料阻燃性能[J].工程塑料应用,2020,48(9):38-43.
- [4] 唐刚,彭中朝,宋强,等.阻燃PLA复合材料的制备及其阻燃性能研究[J].中国塑料,2019,33(1):24-28.
- [5] 陈虹,虎龙,吴中伟,等.芳纶防弹材料阻燃性能的开发[J].高科技纤维与应用,2019,44(5):61-64.