

木质素改性沥青阻燃抑烟性能研究综述

杨春巧

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年7月11日; 录用日期: 2026年8月3日; 发布日期: 2026年8月12日

摘要

木质素与沥青具有相似的化学结构, 且作为一种环境友好、可再生的碳基烃类材料, 近年来在沥青路面领域的应用研究受到广泛关注。本文系统总结了木质素的来源、化学组成以及其在沥青中的多种应用形式, 如改性剂、抗氧化剂、乳化剂和填充剂等, 并重点探讨了木质素改性沥青的燃烧特性及阻燃抑烟机理, 同时介绍了沥青阻燃性能的常用试验方法。本文还结合国内外研究进展, 深入分析了木质素在降低沥青可燃性、抑制烟雾释放以及提升沥青综合路用性能方面的重要影响, 并对未来木质素改性沥青阻燃抑烟材料的研究方向进行了展望。目前, 木质素改性沥青的阻燃抑烟机理尚未得到系统深入的研究, 但已有的研究表明, 木质素能够显著改善沥青的高温流变性、抗老化性能, 并在对沥青进行PG分级后提高其高温等级。因此, 木质素在公路隧道及普通公路建设中具有重要的应用潜力, 其环境友好、可再生且价格低廉的特性使其有望成为未来沥青阻燃抑烟领域的重要发展方向, 未来仍需开展更多研究以推动木质素在路面工程中的广泛应用。

关键词

木质素, 改性沥青, 阻燃抑烟, 阻燃机理, 试验方法

Review on Flame Retardant and Smoke Suppression Properties of Lignin-Modified Asphalt

Chunqiao Yang

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: July 11, 2026; accepted: August 3, 2026; published: August 12, 2026

Abstract

Lignin has a similar chemical structure to asphalt, and as an environmentally friendly and

文章引用: 杨春巧. 木质素改性沥青阻燃抑烟性能研究综述[J]. 土木工程, 2026, 15(8): 76-91.

DOI: 10.12677/hjce.2026.158203

renewable carbon-based hydrocarbon material, its application research in the field of asphalt pavement has received extensive attention in recent years. This paper systematically summarizes the sources, chemical composition of lignin, and its various application forms in asphalt, such as modifier, antioxidant, emulsifier, and filler, and focuses on the combustion characteristics and flame retardant and smoke suppression mechanism of lignin-modified asphalt, while introducing the common test methods for asphalt flame retardant performance. Combined with the research progress at home and abroad, this paper deeply analyzes the important influence of lignin in reducing asphalt flammability, suppressing smoke release, and improving the comprehensive road performance of asphalt, and prospects the future research direction of lignin-modified asphalt flame retardant and smoke suppression materials. At present, the flame retardant and smoke suppression mechanism of lignin-modified asphalt have not been systematically and in-depth studied, but existing studies have shown that lignin can significantly improve the high-temperature rheological properties and anti-aging performance of asphalt and increase its high-temperature grade after PG grading of asphalt. Therefore, lignin has important application potential in highway tunnel and ordinary highway construction. Its environmentally friendly, renewable and low-cost characteristics make it expected to become an important development direction in the field of asphalt flame retardant and smoke suppression in the future. More research is still needed to promote the wide application of lignin in pavement engineering.

Keywords

Lignin, Modified Asphalt, Flame Retardant and Smoke Suppression, Flame Retardant Mechanism, Test Method

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沥青是公路建设主要原材料, 高温下遇火会燃烧并释放 CO 、 CO_2 、 SO_2 等大量有毒气体。沥青路面引燃后温度会急剧升至 800°C 或更高; 若在通风散热不畅、空间受限的隧道内, 缺氧燃烧会产生大量含固液颗粒的有毒烟气, 阻碍氧气更新、降低能见度, 易造成人员中毒或窒息, 严重威胁生命安全[1]。自 2009 年以来, 中国公路隧道每年都以 1100 km 以上的建设速度发展, 是目前世界上公路隧道数量最多、发展速度最快的国家[2]。截至 2023 年底, 对中国已建成运营、正在建设、规划设计的共计 74 座长度 10 km 以上的特长公路隧道进行统计, 其中, 已建成运营特长公路隧道 25 座, 正在建设特长公路隧道 31 座, 规划设计特长公路隧道 18 座。隧道主要集中在中国西南部, 约占 63%, 四川省最多, 其次是云南省; 高速公路隧道达 65 座, 占比约为 88% [3]。传统隧道路面采用水泥混凝土路面, 水泥混凝土路面具有刚度大、养护困难以及抗滑持久性差等问题, 存在较大的行车安全隐患。沥青路面具有良好的抗滑性、低噪声、行车舒适性和易养护等优点, 且随着中国沥青路面施工技术以及隧道通风技术的提升, 近些年来, 国内隧道路面逐渐采用沥青混凝土路面铺筑的形式[4] [5]。在此背景下, 为了促进沥青材料的清洁生产, 推动实现公路工程绿色可持续发展的目标, 诸多学者对木质素沥青阻燃高温性能进行了研究, 期望通过在沥青或沥青混合料中添加天然或人工合成的有机或无机材料从源头解决沥青混合料烟气排放问题, 实现沥青混合料低毒低害、环境友好、结构耐久等多重效益。

近年来, 研究者们发现木质纤维素生物质具有复杂网络的大分子结构, 主要由纤维素($w = 30\% \sim 35\%$)、半纤维素($w = 20\% \sim 40\%$)和木质素($w = 15\% \sim 35\%$)组成。其中木质素是地球上唯一含有苯环的可再生资源,

主要由苯环、甲氧基、羟基、羰基和双键相连的结构组成, 约占生物圈中有机碳的 30%, 是仅次于纤维素的第二大生物质资源[6][7]。而沥青是由不同分子量的碳氢化合物和非金属衍生物组成的黑褐色复杂混合物, 包括许多碳、氢、氧、铁、锑等元素, 在沥青路面主要作为粘合剂。由于木质素的化学结构与沥青相似, 因此越来越多的人开始研究木质素在沥青路面上的应用。木质素在路面工程中最突出的应用是添加沥青作为沥青改性剂, 可以显著提高沥青的耐老化性, 对沥青的高温流变性能、低温抗裂性和抗疲劳性有不同的影响。另外, 木质素掺入沥青中有助于实现绿色减排, 节省经济成本。例如, 陈向东等[8]以棉秆木质素和丙酸酐为原料制备酯化木质素, 探究其对 SBS 改性沥青性能的影响, 结果表明改性后的酯化木质素疏水性和与沥青的相容性提升, 确定最佳掺量为 5% 时可提高 SBS 改性沥青的高温稳定性。吴文娟等[9]对木质素改性沥青进行了改性机理和抗老化机理分析, 结果发现木质素的掺入提升了改性沥青的抗老化性能, 延长了沥青使用时间。阮金奎等[10]研究了木质素改性沥青的高温蠕变恢复性能, 结果发现木质素的掺入能够延缓沥青老化过程中的敏感性。

基于上述背景, 本文系统梳理了木质素的来源、提取方法及其在沥青中的多种应用形式, 综述了国内外木质素改性沥青的研究进展, 重点分析了木质素改性沥青的阻燃抑烟机理, 归纳了当前主流的沥青阻燃剂类型并与木质素进行了对比分析, 介绍了常用的阻燃性能测试方法, 最后提出了未来值得深入探索的研究方向, 以期为木质素在沥青阻燃抑烟领域的进一步研究提供参考。

2. 国内外研究现状

2.1. 国内研究现状

中国对阻燃沥青的研究最早可以追溯到 1989 年武汉工业大学吴国南《对阻燃油毡及阻燃沥青流变学研究》的硕士论文。直到近二十年, 随着沥青路面的优良特性的显现, 阻燃改性沥青才逐渐受到关注。从中国阻燃沥青的研究进展来看, 目前阻燃沥青的研究方法大多是基于纳米阻燃和聚合物材料的阻燃研究基础, 机理研究和应用研究也极为近似, 只是在考察沥青的燃烧特性方面有所不同[11]。2023 年, 刘栋等人[12]在《公路沥青阻燃剂及阻燃性能评价方法综述》一文中归纳了阻燃剂在沥青中的作用机理, 对国内外常用阻燃剂进行汇总分类并分析优缺点, 总结了常用沥青材料阻燃性能试验检测方法, 且对不同阻燃剂及阻燃测试方法的优缺点进行评价。结果表明无卤素、协同阻燃的多元复配阻燃剂是未来发展趋势, 目前阻燃试验多为室内试验, 其评价手段具有局限性, 今后应丰富实际工程应用效果评价试验手段。何兆益等人[13]研究埃洛石纳米管(HNTs)协效常规阻燃剂改性沥青的阻燃性能及机理, 采用多种仪器对 SBS 改性沥青、常规阻燃改性沥青和埃洛石纳米管协效阻燃改性沥青进行阻燃性能测试、燃烧过程中的质量损失和热量变化研究、固相物质和气态产物的时程变化规律研究以及燃烧后沥青残渣的宏微观形貌表征。结果表明 1% HNTs 复配 8% CFR 改性沥青的 LOI 和自燃温度分别为 25.5%、441℃, 表明添加阻燃剂使沥青变为难燃物质, 同时阻燃沥青的热释放速率峰值和烟释放速率峰值明显降低, 具有良好的阻燃性能和抑烟性能。

近年来, 国内在木质素改性沥青阻燃高温性能方面的研究主要集中在木质素的提取与应用、沥青性能提升以及阻燃机理探究等方面。张康等[14]以木质素磺酸钠(LS)为主要原料, 合成改性木质素磺酸钠(MLS)分散剂, 用于制备煤沥青水浆, 并采用多种方法分析其结构及性能, 最后证明 MLS 使煤沥青水浆属于屈服假塑性流体, 屈服应力较小, 具有较好的降黏增稳能力, 利于提高煤沥青水浆的工业应用价值。李学凡等[15]为提升木质素磺酸钠乳化性能, 采用氧化还原体系引发剂经接枝共聚制备改性木质素磺酸钠沥青乳化剂, 探究反应条件对其低温延度的影响, 表征改性前后分子结构, 测试乳化性能与乳化沥青粒径。得出结论: 当 $n(\text{丙烯酸}):n(\text{三乙烯四胺})=1:1$ 、 $m(\text{丙烯酰胺类单体}):m(\text{木质素磺酸钠})=1:1$ 、引发剂用量占单体总质量 1% 时, 改性效果最佳; 所制乳化沥青低温延度达 72.3 cm, 5 d 贮存稳定性达 1.2%,

性能较未改性大幅提升。王雨晴等[16]以生物质木质素为原料，经液化得到多元醇，合成中引入氟化碳化硅(F-SiC)和聚磷酸铵(APP)，制备木质素基超疏水聚氨酯泡沫，研究其结构及油水分离性能，结论为：添加 F-SiC 和 APP 后，泡沫水接触角可达 151.6°，疏水特性优异；机械稳定性、油水分离性能、降解性能和阻燃性能出色，LOI 值可达 28.8% ± 0.4%，阻燃等级达 V-0 级，油水分离过程中吸附容量较高，可重复使用性良好。赵宇宏等[17]对酶解木质素改性沥青在不同老化时程下的性能进行了分析，发现酶解木质素的掺入能显著改善沥青的高温抗变形能力，提高交通等级和 PG 高温分级。各个时间段不同阻燃剂作用原理及优缺点汇总见表 1。

Table 1. Mechanisms, advantages and disadvantages of different flame retardants
表 1. 不同阻燃剂作用原理及优缺点

时间段	阻燃剂的种类	特点	优点	缺点
1950 年~1970 年	磷酸铵、硫酸铵、有机硅烷、氯化有机物	通过化学反应抑制燃烧，形成保护层隔绝氧气和热量	阻燃效果较好，能有效延缓燃烧	部分有机氯化物阻燃剂可能对环境 and 人体有害
1970 年~1980 年	不可燃烧矿物纤维、无机矿物材料	在高温下具有良好的化学稳定性和不可燃性，能有效防止燃烧蔓延	阻燃性能优异，耐高温，不易分解	价格较高，加工难度大，可能影响材料的其他性能
1980 年~1990 年	氢氧化铝、铵化合物、有机溴化合物	氢氧化铝和铵化合物在燃烧时分解吸热，抑制燃烧；有机溴化合物能有效抑制火焰传播	阻燃效率高，能显著降低材料的可燃性	有机溴化合物可能存在环境风险，部分铵化合物可能对材料性能有影响
1990 年~2000 年	硼酸盐、碳酸钠、膨胀型阻燃剂	硼酸盐和碳酸钠在高温下分解产生二氧化碳等阻燃气体；膨胀型阻燃剂在燃烧时形成膨胀泡沫层隔绝氧气和热量	环保性能较好，阻燃效果显著	部分材料的耐热性和机械性能可能受到影响
2000 年~2010 年	卤素阻燃剂、水镁石	卤素阻燃剂在燃烧时释放出卤化氢气体，抑制燃烧连锁反应；水镁石吸热分解，释放出水蒸气	阻燃性能优异，能有效降低燃烧速度和热量释放	卤素阻燃剂在燃烧过程中可能产生有毒气体，水镁石添加量要求高
2010 年~至今	多元复合阻燃剂	结合多种阻燃机制，如膨胀、吸热、自由基捕获等，协同作用提高阻燃效果	阻燃效率高，环保性能好，可满足多种材料的阻燃需求	研发和生产成本较高，工艺复杂
至今	木质素	来源广泛且可再生，含有丰富活性基团，热稳定性和成炭性良好，多种改性方式可提升性能	绿色环保，成本较低，阻燃性能优异，与多种材料相容性好	热稳定性有待提高，阻燃效率有限，力学性能影响，加工性能较差

2.2. 国外研究现状

国外在过去的几十年里，已经开发了几种使用木质素侧流作为部分替代沥青和屋顶中粘合剂沥青的技术。1983 年，Sundstrom 等人[18]发表了一篇文章，描述了木质素作为沥青的添加剂的使用。2008 年，Williams 等人[19]撰写了一篇关于木质素在沥青中的抗氧化作用的报告。木质素的来源是乙醇生产的副产品，其木质素含量在 10%到 12%之间。其他成分是谷物副产品中常见的各种碳水化合物。高达 12%的副产物被添加到沥青中，并评估了其抗氧化效果。这种效果归因于木质素的芳香族聚合物结构。Zhang 等人[20]也报道了木质素在渗透等级为 70/100 的沥青中的抗氧化性能，使用 organosolv 提取的木质素，纯度为 88%，在沥青中加入 10%的木质素，得到 90%沥青和 10%木质素的混合物。作者得出结论，木质素的加入略微降低了沥青的疲劳寿命。Norgbey 等人[21]的报告说，从玉米秸秆中分离出的木质素可以替代

10%的渗透等级为 50/70 和 160/220 的沥青。作者得出结论,添加木质素可减少车辙和低温开裂。近年来已有两项关于木质素在沥青应用中的潜在应用的专利申请。2015 年,Slagheke 等人[22]在沥青渗透等级 70/100 和 160/220 中混合木质素和化学改性木质素的专利被提交。结果表明,天然木质素可以掺入沥青中高达 50%,化学改性木质素可能作为聚合物产生类似于聚合物改性沥青的流变特性。2019 年公布了另一项专利,Landa 和 Gosselink 等人[23]在沥青混合过程中添加木质素,可以替代高达 50%的沥青。与此同时,荷兰的几条道路已经使用后一种技术建造。一开始的重点是沥青路面的顶层或磨损层,最近粘合剂和基层也使用这种技术进行了施工。此外,Moretti 等人[24]首次发表了木质素作为沥青黏结剂应用的生命周期评估(LCA)研究。作者的结论是,LCA 方法在分配和生物成因建模方面与备选方案相结合,作为木质素替代品的使用影响了 LCA 的结果。然而,LCA 显示木质素基产品比化石基产品表现出更好的环境性能。

同时,其他国外研究者也对木质素作为延伸剂、阻燃剂等加入沥青中,对沥青的各种性能进行研究,Wu J 等[25]等研究了将木质素作为沥青延展剂的可行性,发现木质素具有明显的化学活性,能显著影响沥青的性能,使沥青更硬、温度敏感性降低,但也会导致施工温度升高、抗老化能力初期下降,不过长期来看抗老化能力会增强,且存在木质素分层问题,但可通过添加剂解决,总体认为木质素是潜力十足的可持续型沥青延展剂。Batista 等[26]研究木质素改性沥青的高温性能、低温性能和耐候老化性能,结果表明在高温、中温和低温条件下,木质素的加入均提高了沥青的抗变形能力;木质素改性沥青在氮气和氧气氛围下的热稳定性有所提高,且具有更好的光老化抗性。Gao 等[27]研究了不同含量木质素对 PG58-28 基质沥青高温流变性能和疲劳性能的影响,结果表明木质素的加入提高了沥青的流动活化能力和弹性成分,增强了沥青的抗车辙能力和抗老化性能;改性沥青的应力恢复百分比高于基质沥青,且木质素含量越高,应力恢复能力越强;但木质素的加入可能会降低沥青的疲劳寿命,不过当木质素含量低于 8%时,疲劳寿命的降低幅度较小。ArafatS 等人[28]研究使用可持续、可再生的木质素部分替代石油基沥青结合剂,以减少对环境的影响。通过在沥青结合剂中添加最多 6%的三种不同类型的木质素,研究其对老化和未老化沥青结合剂及混合料性能的影响,发现木质素可提高高温性能等级,改善抗老化性能,并增强混合料的抗车辙性、抗裂性和抗水损害性。结果表明木质素可提高沥青结合剂的高温性能等级,改善抗老化性能。含 6%黑液木质素的沥青结合剂在混合料中表现出良好的抗车辙性和抗裂性,用农业废弃物稻壳提取的木质素在沥青结合剂中的应用前景良好。

3. 木质素的来源、应用及提取

3.1. 木质素的来源

自 19 世纪木质素被发现以来,随着对其研究的深入,人们对它的重要性有了越来越清晰的认识。众所周知,木质素属于环境友好的一种可再生生物质资源,木质素的结构中存在着酚羟基、羰基等活性基团,可进行物理共混或羟甲基化、醇解、磺化、氢解、烷基化、胺化、酯化等化学反应改性[29][30],来改善木质素的应用性能,广泛用于油田、建筑业、工农业、采矿业等领域[31][32]。此外,在合成高分子材料中添加木质素,不仅可以提高材料性能,有效利用木质素,还能降低生产成本,具有一定的环境效益和经济效益[33][34]。

木质素主要赋存于木本植物以及草本植物的秸秆与茎秆中,少数微生物及低等植物中虽可能含有少量木质素或木质素类聚合物,但并非木质素的主要来源[35]。木质素的另一类来源为工业副产物,在造纸制浆过程中,需通过化学方法从原料木材中分离纤维素,该过程产生的“黑液”与“红液”中富含大量木质素,是工业生产中提取木质素的主要来源。农业废弃物中,小麦秸秆、水稻秸秆、稻壳、玉米芯、甘蔗渣等农作物收获后的残留物含有丰富的木质素,可通过碱处理、酸处理工艺提取获得;林业加工剩余物,

即木材加工过程产生的锯末、树皮、枝桠材等，也是木质素的潜在来源。

3.2. 木质素的应用

近些年来，木质素广泛应用于材料制备，如环保胶黏剂、碳纤维、可降解塑料，其次是生物能源开发和环境保护，如水处理、土壤修复、CO₂ 捕获，另外在农业生物医药等领域也有应用，如缓释农药载体、药物递送材料，因此，它可以生产许多高价值的功能材料，在沥青的应用中，木质素可以作为沥青乳化剂、改性剂、抗氧化剂等，可把木质素作为阻燃剂来研究，兼具环保价值与高附加值利用潜力，是推动可持续发展的重要生物基资源。如 Weng S 等人[36]为开发具有优异阻燃性能和机械性能的酚醛泡沫用木质素基阻燃剂，采用 9,10-二氢-9-氧-10-磷菲-10-氧化物(DOPO)和三乙基四胺(TETA)对活性木质素进行改性，制备了氮磷掺杂木质素阻燃剂，并用其部分取代苯酚制备阻燃酚醛泡沫，结果表明磷掺杂木质素阻燃剂的引入显著提升了酚醛泡沫的阻燃性能和机械性能，使其具有较高的 LOI 值和良好的抗压强度，同时降低了峰值放热率和峰值排烟率，且在热解过程中形成致密、规则且石墨化程度高的含氮、磷炭渣层，隔离热量和氧气，提高了阻燃性。该研究为利用木质素开发高效环保的沥青新型阻燃剂提供了新的思路和方法，有助于推动生物质资源在阻燃材料领域的应用。

3.3. 木质素的提取

3.3.1. 高沸醇溶剂提取法

高沸醇溶剂提取法是利用具有高沸点的醇溶液在高温条件下溶解木质素再将其分离出来，即可得到高沸醇木质素，高沸醇木质素分散性较好，保留了较好的化学活性[36]。高沸醇溶剂提取法所得木质素纯度高、化学活性高、分子质量较低，试剂可循环利用，但是对设备要求较高，温度通常达到 200℃。常森林[37]将水热耦合高沸醇 1,4-丁二醇的方法应用于核桃壳中木质素的提取，提取率达到 44.66%，比单独使用 1,4-丁二醇提取高约 14.66%。

3.3.2. 有机溶剂提取法

有机溶剂提取法是利用有机溶剂在高浓度下对木质素具有良好的溶解性，低浓度时析出木质素的特性，从而达到木质素与纤维素的高效分离[38]。熊绍俊[39]用工业木质素经有机溶剂分级后，将分级组分与可降解塑料聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)共混，制备木质素/PBAT 复合膜材料。结论：有机溶剂分级可改善工业木质素不均一性；低分子量、低分散性木质素(如针叶材 ESL)与 PBAT 相容性更佳，可显著提升复合膜力学性能；复合膜性能与木质素来源(针叶材优于阔叶材和禾本科)、分子量及官能团结构相关，可通过分级和增容剂调控。Li Y 等人[40]研究有机溶剂提取木质素过程中碱和 1,4-丁二醇含量对木质素提取率、去除率、结构，以及木质素提取物制备活性炭的影响。结果显示：碱含量增加，木质素醚键数量减少，酚羟基数量增加；1,4-丁二醇含量增加，木质素醚键和酚羟基数量减少；二者含量增加均会降低木质素分子量。优化提取条件后制得的活性炭中，C4 缺陷度最小，比表面积最大，为 382 m²·g⁻¹。

3.3.3. 碱、酸提取法

碱法提取木质素主要是利用木质素溶于碱液中形成酚盐的特性，将木质素溶解分离出来[39]。优点是工艺成熟，成本低，适应性强，适用于多种植物原料。但是高温强碱会导致木质素结构破坏，生成缩合产物(如碳碳键)，影响其化学活性。王东玲等[41]研究了 6 种有机醇溶剂提取松木木质素时，溶剂特性对木质素收率的影响，采用 SEM、GPC、NMR 等表征木质素的形貌、分子量与官能团。结果表明：醇溶剂的极性、碳链长度和羟基数目显著影响木质素的收率、形貌、分子量和官能团；碳链越长、极性越弱，木质素收率越高，重均分子量越大；同等碳数下，羟基数越多，收率越低，重均分子量越小；不同醇提取的木质素相关性质呈规律性变化，其中甲醇提取的木质素 C、H 元素含量最高，氧元素含量最低，热值更

高。松木木质素主要结构单元为愈创木基，不同醇提取的木质素单元间连接键主要为 β -O-4、 β - β 和 β -5 三种，提取过程中三种连接键均发生断裂并碎片化溶解。Yong 等人[42]综述了醇提取富含 β -O-4 键木质素的最新进展，讨论了不同醇基溶剂提取的新兴策略，包括醇基深共晶溶剂、流动相分离和微波辅助分离，探讨了废醇回收利用策略。结论表明：醇可通过 α -醚化保护 β -O-4 键避免降解，一般链长的单醇和二醇的 β -O-4 键木质素收率更高；醇基深共晶溶剂可用于该类木质素提取，流动相和微波辅助醇分离技术具有潜力，但仍面临高沸点醇有效回收等挑战。

酸法提取木质素是向碱溶后的溶液中加入酸，调节 pH 至 2~3，使木质素盐质子化形成沉淀实现分离。该方法对设备损耗严重，试剂回收困难，存在环境污染问题。李双洋[43]研究了利用甲酸提取针叶木木质素，通过有机溶剂对木质素进行分子量分级与化学改性，制备木质素基高效混凝土减水剂，优化了甲酸提取条件，分析了分级后木质素结构变化，经氧化-磺甲基化改性制备出高减水率木质素基减水剂。结果表明：优化提取条件下，松木脱木素率达 87.2%，纤维素纯度达 89.3%；分级后木质素反应活性点更多，更易改性；改性木质素掺量为 0.3% 时，水泥净浆流动度可达 178 ± 2 mm，减水率达 21%，符合高效减水剂要求；有机溶剂回收再利用可降低生产成本。Ma 等人[44]研究了马来酸作为木质素有效溶剂，在温和条件下提取木质素并改变其化学结构的情况。结果表明，马来酸处理后，木质素分散指数从 2.86 降至 1.25，纯度和均匀性大幅提高；乙酸乙酯提取的木质素酚羟基含量最高，马来酸提取的木质素中 β -O-4 键部分断裂，更多疏水性底物经 C-C 键被乙酸乙酯回收，得到了结构与官能团不同的木质素碎片，为木质素在多领域的应用提供了广阔前景。

4. 木质素改性沥青的阻燃机理分析

4.1. 沥青的燃烧过程与阻燃要素

目前国内外学者通常将沥青材料分为沥青质、胶质、芳香分与饱和分四组分，其中沥青质与胶质两类大分子化合物占比越高，芳香分与饱和分占比越低，其燃点越高，反之燃点越低，一般基质沥青的燃点在 300℃ 左右[45]。沥青燃烧的过程主要分为两个阶段：第一阶段当沥青温度达到 300℃ 时，沥青四组分中的轻质组分开始燃烧并且释放出二氧化碳、一氧化碳、水、甲烷、甲醛、碳氢化合物、芳香族化合物等气体；第二阶段沥青温度继续升高达到 520℃ 时，第一阶段中释放的易燃气体被点燃开始燃烧，并且沥青四组分中的沥青质与胶质等大分子物质进一步开始燃烧，并将产生如醇类、酚类等物质[46][47]。从物质燃烧的机理可知，燃烧发生包含氧气、可燃物、热量三要素，因此阻燃剂的作用机理主要是通过阻断或抑制这三要素的产生与聚合。

4.2. 木质素的阻燃机理

木质素作为天然阻燃剂，其作用机理主要通过气相捕捉燃烧自由基、凝聚相脱水成炭形成隔热隔氧屏障，以及中断热氧交换实现[48]。高温下释放芳香族化合物捕捉-OH 等自由基抑制链式反应，分解产生不燃气体稀释氧气；芳香环与羟基、甲氧基等官能团协同脱水缩合，形成致密炭层阻隔热量和氧气传递，抑制基材熔融滴落；与磷/氮阻燃剂或金属化合物复配可产生协同效应，增强成炭与自由基捕捉能力。阻燃性能受芳香结构含量、官能团分布及分子量等影响。

虽然目前直接将木质素作为沥青阻燃剂的应用研究仍十分有限，但是木质素在阻燃的其他领域的应用也不断拓展。呼微等人[49]将异氰尿酸三缩水甘油酯(TGIC)的环氧键与木质素、氨基三甲叉磷酸(ATMP)键连，再经苯甲酸与 ATMP 羟基反应，制得氮磷木质素基阻燃剂 LTAB，将其加入聚氨酯(PU)泡沫体系发泡得到阻燃聚氨酯泡沫(PUF)。结果显示，LTAB 与 PU 发泡体系相容性良好，可有效提升 PU 泡沫阻燃性能与力学性能：当 LTAB 含量为 25% 时，PUF 氧指数达 28%，为难燃材料，压缩永久变形率降低，

形态稳定性良好；LTAB 可促进膨胀炭层形成，提升阻燃性能。该研究为木质素在聚氨酯泡沫阻燃领域的应用提供了基础，也为开发沥青用环保高效生物质基阻燃剂提供了新途径。Weng 等人[50] Weng 等人用 9,10-二氢-9-氧-10-磷菲-10-氧化物(DOPO)和三乙基四胺(TETA)改性活性木质素，制得氮磷掺杂木质素阻燃剂(NP-LMDL)，再用其部分取代苯酚制备阻燃酚醛泡沫(NP-LMDLPF_x)。结果表明：NP-LMDLPF15 与纯酚醛泡沫(PF)相比，极限氧指数(LOI)提高 33.3%，抗压强度提高 43.7%，峰值放热率(pHRR)降低 48.0%，峰值排烟率(pRSR)降低 53.2%；氮磷掺杂木质素可在热解时形成致密规则、高石墨化程度的含氮磷炭渣层，隔离热量和氧气，有效提升酚醛泡沫的阻燃性能与机械性能。该研究为开发木质素基高效环保沥青阻燃剂提供新思路，有助于推动生物质资源在阻燃材料领域的应用。木质素的阻燃机理可归纳为以下几个方面：

- (1) 凝聚相成炭：木质素具有高度芳香化的分子结构，在高温下(通常 300℃~500℃)通过自由基反应发生交联和缩合，形成具有石墨化结构特征的致密炭层[48]。该炭层覆盖在沥青表面，作为物理屏障阻隔外界氧气和热量向内部传递，同时抑制内部可燃性裂解产物的逸出。
- (2) 气相自由基淬灭：木质素热裂解产生的酚类片段和苯氧自由基能够与燃烧链式反应中的·H 和·OH 等高活性自由基结合，从而中断燃烧链式反应，减缓燃烧进程[51]。
- (3) 气相稀释：木质素在热解过程中释放 CO₂、H₂O、CH₄ 等不可燃或低可燃性气体，这些气体能够稀释沥青表面附近的可燃气体和氧气浓度，降低燃烧强度[52]。
- (4) 协同阻燃：木质素含有丰富的酚羟基和醇羟基，可与磷系阻燃剂形成氢键网络，在高温下共同促进膨胀炭层的形成，从而以更低的阻燃剂添加量达到更优的阻燃效果。

5. 沥青阻燃剂的对比分析与木质素的优势

5.1. 沥青阻燃剂的主要类型

沥青阻燃剂按化学组成和作用机理主要分为卤系、磷系、氮系、金属氢氧化物、膨胀型阻燃体系(IFR)、纳米协同体系及复合阻燃剂等类型。各类阻燃剂的阻燃机理、典型材料及其核心优缺点汇总于表 2。

由表 2 可知，传统阻燃剂虽可提升沥青极限氧指数、降低热释放速率，但普遍存在不可再生、资源依赖性强、环境负荷大或影响沥青路用性能的问题。相比之下，木质素是来源广泛的可再生天然芳香族高分子材料，在绿色环保、成本和功能集成上有天然优势。其阻燃功能源于高度芳香化结构，高温下可形成石墨化炭层，热裂解产物可发挥自由基淬灭与气相稀释协同作用。同时木质素含大量羟基，可为化学改性、功能设计，以及与阻燃元素键合、与传统阻燃剂复配提供结构基础。因此，木质素作为沥青阻燃剂核心组分，是缓解传统阻燃剂环境风险、实现沥青阻燃功能绿色化的重要方向。

Table 2. Types, mechanisms, materials, advantages and disadvantages of asphalt flame retardants
表 2. 沥青阻燃剂类型、机理、材料及优缺点

阻燃剂类型	阻燃机理	典型材料举例	优点	缺点	参考文献
卤系阻燃剂	气相自由基淬灭 (释放 HX 捕捉 HO·、H·)	十溴二苯醚(DBDPO)、四溴双酚 A (TBBPA)、十溴二苯乙烷(DBDPE)	阻燃效率高，添加量少(5%~15%)；对沥青力学性能影响小	燃烧时释放有毒、腐蚀性气体(如 HBr、二噁英)；环境风险高，逐步被禁用	[53]-[55]
磷系阻燃剂	凝聚相成炭 + 气相自由基抑制	红磷(需包覆)、聚磷酸铵(APP)、磷酸三苯酯(TPP)、间苯二酚双(二苯基磷酸酯)(RDP)	阻燃效率较高，低烟低毒，热稳定性好，环保性好	单独使用效果有限，易吸潮，部分品种与沥青相容性差	[56]-[58]

续表

氮系阻燃剂	吸热脱水 + 稀释可燃气体 + 形成保护层	三聚氰胺、三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)、三聚氰胺磷酸盐	低毒、低烟，常与磷系协效使用，环保性好	单独使用效果差，高温下可能释放氨气，需复配使用	[59] [60]
金属氢氧化物	吸热脱水 + 稀释可燃气体 + 形成保护层	氢氧化铝(ATH)、氢氧化镁(MDH)	无毒、抑烟、环保、价格低廉，兼具填充功能	添加量大($\geq 40\%$)，影响沥青力学性能与施工和易性，与沥青相容性差	[61]-[63]
膨胀型阻燃体系(IFR)	高温膨胀形成多孔炭层，隔热隔氧	酸源(APP)、碳源(季戊四醇)、气源(三聚氰胺)	阻燃效率高，低烟无毒，炭层结构稳定，环保性好	添加量大($\geq 40\%$)，影响沥青力学性能与施工和易性，与沥青相容性差	[60] [64]
纳米协同体系	形成物理屏障促进炭层致密化 + 增强热稳定性	有机蒙脱土(OMMT)、石墨烯、碳纳米管、海泡石	添加量少即可改善阻燃性，同时提升力学性能与热稳定性	阻燃效果有限，需与其他阻燃剂协同使用，分散困难，成本高	[65]
复合阻燃剂	多机制协同(气相 + 凝聚相 + 吸热 + 成炭)	卤 - 锑体系(DBDPE + Sb_2O_3)、磷 - 氮体系(APP + MCA)、磷 - 铝体系(APP + ATH)	阻燃效率高，综合性能优异，可降低单一阻燃剂用量	配方复杂，成本较高，需优化相容性与分散性	[52]
木质素阻燃剂	高温成炭：芳香结构及大量羟基在高温下交联成致密炭层，隔绝热量和氧气	碱木质素(Lig)、木质素磺酸钠/钙、磷 - 氮 - 硅改性木质素(FR-Lig、Si-N-Lig)、木质素基膨胀型复合体系(木质素 + APP + 季戊四醇)	来源丰富、可再生、环保无毒，符合绿色可持续发展方向	单独使用时阻燃效率有限，需与磷、氮、硅等协效组分复配	[48] [49]

5.2. 木质素与常规阻燃剂的对比

(1) 资源可再生与环境友好：木质素来源于制浆造纸和生物炼制副产物，属于生物质资源，与卤系阻燃剂相比，显著降低了“二次灾害”风险。与卤系、合成磷系等不可再生阻燃剂相比，可降低对化石资源的依赖，符合“双碳”目标[66]。

(2) 本质成炭能力优异。无需昂贵改性即可达到 30%以上残炭率，优于 ATH/MDH 单纯吸热机理。木质素的芳香环结构赋予其天然的高成炭倾向，成炭过程属于“本征型”阻燃路径，炭层致密且具有一定的石墨化程度，隔热隔氧效果显著[48]。

(3) 多功能集成特性。木质素同时兼具抗氧化、抗紫外和增黏作用，可改善沥青高温抗变形及抗老化性能[17]，实现“一剂多效”，而传统阻燃剂通常为单一功能，甚至对沥青路用性能产生负面影响。

(4) 与膨胀型阻燃剂天然相容。木质素含酚羟基、醇羟基，可与聚磷酸铵(APP)形成氢键网络，抑制 APP 迁移吸潮[67]，同时其自身可作为碳源参与膨胀成炭，有效降低 IFR 体系中季戊四醇的用量。

但木质素作为沥青阻燃剂也存在以下不足：单独添加时阻燃效率有限，通常需较高掺量约为 10%~30%才能达到明显的阻燃效果；部分木质素品种在 200℃~300℃即开始热解，可能影响沥青的加工和服役性能；与沥青的相容性因木质素来源和提取方法而异，可能导致改性沥青的储存稳定性和力学性能波动。因此，对木质素进行化学改性，如磷酸化、硅烷化、酯化等，或与其他阻燃剂协同复配，是提升其阻燃效率和应用价值的重要途径。

6. 木质素改性沥青测试方法

6.1. 闪燃点及极限氧指数(LOI)测试

依据《规程》中的克利夫兰开口杯闪点测试法进行沥青的闪点和燃点测试,选取的设备为克利夫兰开口杯闪点试验仪。沥青闪点指标通常是用以表征沥青存储安全性能,燃点表征的是施工安全性能。极限氧指数是根据试样在氧气和氮气混合气流中恰好能够保持平稳燃烧状态所需的最低氧气浓度来判定材料阻燃性的一种方法。常被用于评价聚合物材料的阻燃性,当材料的氧指数大于 26%时,该材料则会在空气中自行熄灭[68]对于沥青路面,若遭遇火灾,沥青燃烧自上而下传播,与 LOI 试验方法类似。Yang [69]采用氢氧化铝-有机蒙脱土(ATH/OMMT)作为阻燃剂对沥青进行改性,并通过 LOI 试验研究了 FRA 的阻燃性,结果表明 FRA 具有优异的阻燃性;阻燃剂的加入可以提高着火温度,减少燃烧过程中的放热。然而,由于沥青受热易滴落、流淌,其制样难度较大,且不同制样方法得到的测试结果差异较大,影响了数据的可靠性和可比性。国标 GB8624-2012《建筑材料及制品燃烧性能分级》¹中规定,建材的燃烧等级有三种,分别为:

当 $LOI < 21\%$ 时,材料的极限氧指数小于空气中的氧浓度,该材料为易燃性材料;

当 $21\% < LOI < 27\%$ 时,该材料为可燃性材料;

当 $LOI > 27\%$ 时,该材料为自熄性材料。因此,可通过 LOI 来评价沥青的易燃、可燃性能等级[70]。

6.2. 动态剪切流变仪(DSR)测试

温度和频率这两大因素会影响着沥青路面的服务寿命。其中温度一般由气候环境决定;而频率是指外部荷载频率,一般由交通荷载量决定。因此,为了对沥青材料性能和结构进行分析,我们有必要先研究温度和频率这两大因素的变化对沥青力学性能的影响,然后进一步地建立相应的力学模型[71],研究阻燃沥青的流变特性,如相位角、复数模量等参数的变化。通过 DSR 测试可以了解阻燃剂对沥青在不同温度和频率下的粘弹性行为的影响,评估阻燃沥青在实际使用中的力学性能。

6.3. 示差扫描量热法(DSC)测试

DSC 能准确测量物质的转变温度、转变焓。将样品和对照物置于相同的热条件下。通过补偿器对试样补充或减少热量使其与对照物温度相同,则可得到保持温差为零所需热量与温度(或时间)的对应关系。采用 DSC 可以研究沥青随温度的变化情况,进而评价沥青的性质[72]。温度变化导致沥青内组分聚集状态发生变化,通过 DSC 曲线可以分析出沥青相态转化时热量变化大小(吸收峰的面积)与发生相态转化时的温度范围,在程序控制温度下样品内发生的物理化学反应的热量变化体现在 DSC 曲线上。一般来说,吸热量越大,说明这个温度范围内发生相态转变的组分数量越多,微观组分结构变化程度大,表现为沥青宏观性质迅速变化,温度稳定性差。贺孟霜[73]对沥青四组分 DSC 谱图进行分析后提出,相比芳香分与饱和分,沥青质与胶质 DSC 曲线更平稳,性质更加稳定。饱和分的吸热峰值能量远大于沥青的吸热峰值能量,且吸热温度范围宽,对沥青的热性能影响很大。

6.4. 热重分析(TG)及微分热重分析(DTG-MS)联用测试

通过 TG-MS 系统,例如采用 NETZSCHSTA409 热重分析仪和 QMS403C 质谱分析仪联用,在氮气和氧气混合的气氛下,以一定的升温速率加热沥青样品,记录样品质量随温度的变化曲线(TG 曲线)和质量损失速率随温度的变化曲线(DTG 曲线)。依据 TG 曲线能够获取沥青在燃烧过程中的剩余质量,剩余质量越高,表明阻燃剂对沥青的保护作用越好,阻燃性能越强。DTG 曲线则可以直观地反映沥青燃烧过

¹<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=EA060DF73D92A5AA9F63C1743DDB75DB>

程中的质量损失速率变化,质量损失速率越低,意味着阻燃剂抑制沥青燃烧的效果越佳。近几年来,DSC-TG 与质谱(MS)联用技术得到迅速发展,DSC-TG 测定程序温度下反应过程中的热量、质量变化,通过与 MS 联用能分析沥青在加热过程中逸出介质的成分,从而对沥青的受热分解过程进行全面分析[74] [75]。马峰[76] [77]等对沥青的分解过程进行了研究,结果表明,在 230℃左右沥青出现了质量损失,这与沥青的闪点指标一致,分析是由于轻组分挥发,在 400℃左右时,质谱检测到离子流强度显著变化,沥青分解反应主要产物有 CO, CO₂, H₂O 和 CH,表明沥青中存在丰富的 COOH、-CHO-、-CO-、COOCH, 等结构,在 450~500℃分解基本结束。

6.5. 傅里叶变换红外光谱测试

红外(IR)光谱是分子振动光谱,其辐射能量远小于紫外光,通过分子中的原子在其平衡位置附近做振动运动,不同化学键或官能团的振动频率不同,当红外光的频率与分子中某一化学键的振动频率相同时,分子会吸收该频率的红外光,导致振动能级跃迁。FTIR 通过测量分子对不同波长红外光的吸收强度,得到红外吸收光谱,光谱中的特征吸收峰对应特定的化学键或官能团,据此可分析物质的化学结构。一般所说的红外光谱也就是指中红外光谱,其波数范围为 4000~400 cm⁻¹。可以根据红外峰的位置来确定官能团,进而对物质进行定性分析。Hao [78]认为沥青热解主要分轻组分的挥发、主反应阶段两个过程,沥青与其组分主反应阶段生成的气体产物相似,主要包括 CO、CH、C₂H 和其他轻质脂肪烃和烯烃、轻质芳烃和硫化氢。

6.6. 锥形量热仪测试

锥形量热仪试验较沥青闪燃点、传统极限氧指数、垂直燃烧等试验对真实火灾环境模拟效果更相似,与大型燃烧试验结果相关性良好,其评价指标包含释放速率(HRR)、烟释放速率(SPR)、总热量释放(THR)、总生烟量(TSR)、总质量损失(TML)、质量损失率(MLR)、碳氧化物释放量,以及点燃时间和燃烧持续时长等,对阻燃剂使用效果评价更全面。何立平[79]采用锥形量热仪试验对膨胀阻燃剂、无机阻燃剂、溴系阻燃剂改性后沥青阻燃特性进行研究,发现阻燃剂可显著降低沥青混合料燃烧时产生的热量和烟气,并且其与极限氧指数试验相关性良好[80] [81]。

6.7. X 射线衍射测试

根据布拉格定律,要产生衍射,必须使入射线与晶面所成的交角 θ 及 X 射线波长 λ 之间满足布拉格方程:

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

也就是说,X 射线衍射线的位置由晶胞的形状和大小决定,因此能反映各晶面的面间距信息。因此,XRD 技术可以被用来研究物质的结构[82]。

6.8. 扫描电子显微镜测试

扫描电子显微镜(SEM)与环境扫描电镜(ESEM)都具有很高的分辨率,能对试样的微观形貌、结构和成分进行观察,已成为众多基础学科的研究方法,在纳米尺度上研究沥青结构,为进一步分析沥青改性、老化再生过程提供了途径[83]。刘圣洁[84]通过对比 SBS 改性沥青与阻燃改性沥青燃烧后的残留表面物发现 SBS 改性沥青燃烧后的残留物表面分布着松散多孔的颗粒团状物,表面的孔洞为气体挥发或者分解逸出造成。添加阻燃剂后,阻燃沥青在燃烧后形成了致密厚实的高质量片状炭层结构,其成分为热膨胀生成的石墨炭层、氢氧化铝热分解生产的保护层。

本文汇总了不同阻燃沥青试验测试方法及优缺点评价，见表 3。

Table 3. Testing methods for different flame-retardant asphalts and their advantages and disadvantages
表 3. 不同阻燃沥青试验测试方法及优缺点

测试方法	试验方法与依据标准	主要评价项目	操作复现性	优点	缺点
闪点与极限氧指数 (LOI)测试	克利夫兰开口杯法 (ASTM D92)、NB/SH/T0815—2010	闪点、燃点、LOI 值 ($\geq 23\%$ 为阻燃)	中等	仪器简单，数据明确，LOI 与阻燃性相关性强	沥青滴落影响测试，制样方式差异大，重复性受限
动态剪切流变仪 (DSR)测试	AASHTO T315、SHRP 规范	复数模量、相位角、车辙因子	高	可模拟高温流变行为，评价阻燃剂对高温性能影响	对阻燃机制解释力有限，需结合其他手段
示差扫描量热法 (DSC)测试	ASTM D3418、ISO 11357	玻璃化转变温度、熔融焓、热稳定性	高	精确测量热行为变化，评估阻燃剂热响应	样品量小，可能不具代表性，需与其他方法联合
热重分析(TG)及 DTG-MS 联用测试	ISO 11358、STA 449 系列	起始分解温度、最大失重速率、气体逸出种类	高	同时获取热行为与气体释放信息，支持阻燃机理分析	设备昂贵，操作复杂，需专业解析
傅里叶变换红外光谱测试(FT-IR)	ASTM E1252、压片法	起始分解温度、最大失重速率、气体逸出种类	中等	快速识别化学结构变化，辅助判断阻燃路径	需样品前处理，定量能力弱，易受杂质干扰
锥形量热仪测试 (Cone Calorimeter)	ISO 5660-1	热释放速率(HRR)、总热释放(THR)、烟生成速率(SPR)	高	模拟真实燃烧环境，数据全面，国际通用	样品量大，测试周期长，设备成本高
X 射线衍射测试 (XRD)	ASTM D934	阻燃剂晶体结构变化、无机残留物组成	高	明确阻燃剂热解产物晶型变化	对非晶态炭层识别能力差，需配合 SEM 使用
扫描电子显微镜测试(SEM)	ASTM E986	炭层形貌、阻燃剂分散性、微观结构	中等	直观观察炭层致密性与结构完整性	需喷金处理，样品制备复杂，结果解释依赖经验

7. 结语与展望

综上所述，木质素作为来源广泛的可再生环保天然高分子材料，因化学结构与沥青高度相似，在提升沥青阻燃抑烟性能方面有独特优势。本文梳理了木质素的来源、提取方法及其在沥青中的应用，探讨了木质素改性沥青的阻燃抑烟机理，明确其通过多重机制抑制沥青燃烧的热量释放与有毒烟气生成；归纳了当前主流阻燃剂类型的优缺点，强调木质素在绿色环保、成本控制及性能协同方面的突出潜力。木质素改性沥青兼具环保、经济与功能提升优势，是公路工程绿色可持续发展的重要方向，但目前相关研究仍处于起步阶段，未来应从 4~5 个具体方向深入开展研究：

(1) 分子设计与功能化改性。木质素分子含酚羟基、醇羟基与芳香环，可为化学改性提供充足活性位点。未来可通过磷酸化、硅烷化、酯化、胺化等化学接枝手段，在木质素分子引入磷、氮、硅等阻燃元素，增强其凝聚相成炭能力和气相自由基淬灭效果；同时关注改性对木质素与沥青相容性的影响，实现“相容性 - 阻燃性 - 力学性能”的综合优化，其中磷酸化改性可提高木质素成炭率与炭层石墨化程度，硅烷化改性可改善木质素疏水性与热稳定性，接枝长链烷基可提高木质素在沥青中的分散性与储存稳定性。通过分子层面精准设计，有望获得兼具高效阻燃和良好路用性能的木质素基阻燃剂。

(2) 多尺度模拟与机理揭示。目前木质素在沥青热解中的阻燃机制依赖实验推测, 缺乏原子、分子层面直接证据。建议采用分子动力学(MD)模拟和反应力场模拟, 从分子层面模拟木质素及其衍生物高温下的热解路径、自由基生成淬灭过程与炭层动态演化行为, 揭示木质素不同结构单元对阻燃性能的差异化贡献。同时通过密度泛函理论(DFT)计算, 获取木质素模型化合物与沥青典型分子的相互作用能、反应能垒等参数, 为木质素定向改性与高效阻燃体系构建提供理论指导。

(3) 性能均衡与长效性研究。当前木质素改性沥青研究多集中于阻燃性能与高温流变性能, 缺乏对路用性能尤其是抗疲劳、低温抗裂、抗水损害与长期耐候老化性能的系统评估。木质素提升高温性能的同时, 可能负面影响低温与疲劳性能, 需在阻燃剂掺量、改性方式、配合比设计等方面综合平衡。此外, 应通过长期老化和加速加载试验, 研究木质素阻燃剂在沥青路面服役过程中的性能衰减规律与阻燃功能持久性, 探索通过微胶囊包覆、抗氧化剂复配等手段延长其有效使用寿命的方法。

(4) 标准化测试与评价体系构建。当前阻燃沥青性能评价多借鉴其他聚合物材料测试标准, 缺乏适配沥青特点的标准化测试方法, 建议建立覆盖真实火灾场景的标准化测试与评价体系, 包含小尺度材料筛选试验、中尺度构件试验、足尺路面火灾验证试验, 同时统一试样制备方法、燃烧条件与评价指标, 提升测试结果可比性与工程应用可靠性。

(5) 生命周期评估与工程示范。木质素作为制浆造纸和生物炼制副产物, 其资源化利用的环境效益需通过全生命周期评估(LCA)量化, 未来应建立从原料收集到退役回收的全链条 LCA 模型, 评估其相比传统阻燃沥青、普通沥青的环境效益。同时依托实际工程铺筑试验段, 验证性能, 形成可推广的工程应用技术指南。

通过多学科交叉研究与产学研协同, 木质素有望成为新一代沥青阻燃抑烟材料的关键组分, 为隧道安全与低碳公路建设提供技术支撑。

参考文献

- [1] Qiu, J.L., Yang, T., Wang, X.L., Wang, L. and Zhang, G. (2019) Review of the Flame Retardancy on Highway Tunnel Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, **195**, 468-482. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.034>
- [2] 罗刚. 中国 10 km 以上超长公路隧道统计[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(8): 1380-1383.
- [3] 刘继国, 崔庆龙, 李丹妮, 等. 截至 2023 年底中国 10 km 以上特长公路隧道统计与分析[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(1): 189-198.
- [4] Xu, T., Huang, X.M. and Zhao, Y.L. (2011) Investigation into the Properties of Asphalt Mixtures Containing Magnesium Hydroxide Flame Retardant. *Fire Safety Journal*, **46**, 330-334. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.05.001>
- [5] Qun, Y. and Guo, Z.Y. (2005) Mixture Design of Fire-Retarded OGFC in Road Tunnel. *Road Materials and Pavement Design*, **6**, 255-268. <https://doi.org/10.1080/14680629.2005.9690008>
- [6] Jadsadajerm, S., Muangthong-on, T., Wannapeera, J., Ohgaki, H., Miura, K. and Worasuwanarak, N. (2018) Degradative Solvent Extraction of Biomass Using Petroleum Based Solvents. *Bioresource Technology*, **260**, 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.124>
- [7] Boerjan, W., Ralph, J. and Baucher, M. (2003) Lignin Biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, **54**, 519-546. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.134938>
- [8] 陈向东, 袁永坤, 邵凯凌, 等. 木质素的改性及其对 SBS 改性沥青性能的影响[J]. 化工新型材料, 2025, 53(7): 285-290.
- [9] 吴文娟, 金永灿, 吴建涛, 等. 木质素改性沥青的红外光谱分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 120-124.
- [10] 阮金奎, 付鑫, 饶应军, 等. 基于多应力蠕变恢复评价木质素改性沥青高温性能[J]. 应用化工, 2023, 52(1): 17-21, 27.
- [11] 任梵, 张晓娇, 孙海斌, 等. 国内外路用阻燃沥青的研究现状与展望[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(6): 1-10.

- [12] 刘栋, 曾俐豪, 冯学茂, 等. 公路沥青阻燃剂及阻燃性能评价方法综述[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(3): 104-107, 149.
- [13] 何兆益, 谭洋伟, 李家琪, 等. 埃洛石纳米管协效阻燃改性沥青性能及机理研究[J]. 材料导报, 2022, 36(2): 72-79.
- [14] 张康, 张瑞宁, 程晓亮, 等. 改性木质素磺酸钠在煤沥青水浆中的性能研究[J]. 化学工程, 2024, 52(3): 72-77, 83.
- [15] 李学凡, 唐新德, 郭海超, 等. 改性木质素磺酸钠沥青乳化剂的合成及应用性能[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(1): 70-73.
- [16] 王雨晴, 吕婉蓉, 崔明辉, 等. 超疏水阻燃木质素基聚氨酯泡沫材料的结构及油水分离研究[J]. 化工新型材料, 2025, 53(12): 251-257.
- [17] 赵宇宏, 彭顺显, 廖春花, 等. 酶解木质素改性沥青在不同老化时程下性能分析[J]. 应用化工, 2025, 54(02): 383-392, 397.
- [18] Sundstrom, D.W., Klei, H.E. and Daubenspeck, T.H. (1983) Use of Byproduct Lignins as Extenders in Asphalt. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, **22**, 496-500. <https://doi.org/10.1021/i300011a022>
- [19] Williams, R. (2008) The Utilization of Agriculturally Derived Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder. Master's Thesis, Iowa State University Digital Repository. http://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/14
- [20] Zhang, Y., Liu, X., Apostolidis, P., Gard, W., van de Ven, M., Erkens, S., *et al.* (2019) Chemical and Rheological Evaluation of Aged Lignin-Modified Bitumen. *Materials*, **12**, Article 4176. <https://doi.org/10.3390/ma12244176>
- [21] Norgbey, E., Huang, J., Hirsch, V., Liu, W.J., Wang, M., Ripke, O., *et al.* (2020) Unravelling the Efficient Use of Waste Lignin as a Bitumen Modifier for Sustainable Roads. *Construction and Building Materials*, **230**, Article ID: 116957. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116957>
- [22] Slaghek, T., *et al.* (2015) Bitumen Composition. World Intellectual Property Organization. Patent WO2015137813.
- [23] Landa, P. and Gosselink, R. (2019) Lignin-Based Bio-Asphalt. World Intellectual Property Organization, Patent WO2019092278.
- [24] Moretti, C., Corona, B., Hoefnagels, R., Vural-Gürsel, I., Gosselink, R. and Junginger, M. (2021) Review of Life Cycle Assessments of Lignin and Derived Products: Lessons Learned. *Science of the Total Environment*, **770**, Article ID: 144656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144656>
- [25] Wu, J., Liu, Q., Wang, C., Wu, W. and Han, W. (2021) Investigation of Lignin as an Alternative Extender of Bitumen for Asphalt Pavements. *Journal of Cleaner Production*, **283**, Article ID: 124663. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124663>
- [26] Batista, K.B., Padilha, R.P.L., Castro, T.O., Silva, C.F.S.C., Araújo, M.F.A.S., Leite, L.F.M., *et al.* (2018) High-Temperature, Low-Temperature and Weathering Aging Performance of Lignin Modified Asphalt Binders. *Industrial Crops and Products*, **111**, 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.010>
- [27] Gao, J., Wang, H., Liu, C., Ge, D., You, Z. and Yu, M. (2020) High-Temperature Rheological Behavior and Fatigue Performance of Lignin Modified Asphalt Binder. *Construction and Building Materials*, **230**, Article ID: 117063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117063>
- [28] Arafat, S., Kumar, N., Wasiuddin, N.M., Owhe, E.O. and Lynam, J.G. (2019) Sustainable Lignin to Enhance Asphalt Binder Oxidative Aging Properties and Mix Properties. *Journal of Cleaner Production*, **217**, 456-468. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.238>
- [29] Duval, A. and Lawoko, M. (2014) A Review on Lignin-Based Polymeric, Micro- and Nano-Structured Materials. *Reactive and Functional Polymers*, **85**, 78-96. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.09.017>
- [30] Graichen, F.H.M., Grigsby, W.J., Hill, S.J., Raymond, L.G., Sanglard, M., Smith, D.A., *et al.* (2017) Yes, We Can Make Money Out of Lignin and Other Bio-Based Resources. *Industrial Crops and Products*, **106**, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.036>
- [31] S. Abdel Zaher, K., Swellem, R.H., A.M. Nawwar, G., M. Abdelrazek, F. and H. El-Sabbagh, S. (2014) Proper Use of Rice Straw Black Liquor: Lignin/Silica Derivatives as Efficient Green Antioxidants for SBR Rubber. *Pigment & Resin Technology*, **43**, 159-174. <https://doi.org/10.1108/prt-01-2013-0001>
- [32] Naseem, A., Tabasum, S., Zia, K.M., Zuber, M., Ali, M. and Noreen, A. (2016) Lignin-Derivatives Based Polymers, Blends and Composites: A Review. *International Journal of Biological Macromolecules*, **93**, 296-313. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.08.030>
- [33] Kun, D. and Pukánszky, B. (2017) Polymer/Lignin Blends: Interactions, Properties, Applications. *European Polymer Journal*, **93**, 618-641. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.04.035>
- [34] Yuan, Y.Q., Gao, D.Y., Zhao, J., Tang, J.Y. and Zhai, S.H. (2011) Experimental Study on Water Stability of Asphalt Mixture. *Advanced Materials Research*, **266**, 135-138. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.266.135>

- [35] 王芷, 刘乾静, 刘莉, 等. 木质素提取及木质素吸附剂制备方法研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(6): 16-19.
- [36] Weng, S., Li, Z., Bo, C., Song, F., Xu, Y., Hu, L., *et al.* (2023) Design Lignin Doped with Nitrogen and Phosphorus for Flame Retardant Phenolic Foam Materials. *Reactive and Functional Polymers*, **185**, Article ID: 105535. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105535>
- [37] 常森林. 核桃壳木质素提取及制备酚醛树脂泡沫的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2017.
- [38] 李丰泉. 辣木籽壳吸附性及木质素提取与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [39] 熊绍俊. 有机溶剂分级工业碱木质素在木质素/PBAT 复合膜材料中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [40] Li, Y., Hou, S., Wei, Q., Ma, X. and Qu, Y. (2021) Effect of Alkali and 1,4-Butanediol Contents on the Extraction of Lignin and Lignin-Based Activated Carbon. *ACS Omega*, **6**, 34386-34394. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04318>
- [41] 王东玲, 王文锦, 彭梓芳, 等. 醇溶剂提取松木木质素及其结构表征[J]. 化工学报, 2020, 71(8): 3761-3769.
- [42] Yong, K.J. and Wu, T.Y. (2023) Recent Advances in the Application of Alcohols in Extracting Lignin with Preserved B-O-4 Content from Lignocellulosic Biomass. *Bioresource Technology*, **384**, Article ID: 129238. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129238>
- [43] 李双洋. 甲酸木质素的提取、结构表征及化学改性的研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.
- [44] Ma, S., Chen, B., Zeng, A., Li, Z., Tang, X., Sun, Y., *et al.* (2022) Chemical Structure Change of Lignin Extracted from Bamboo Biomass by Maleic Acid. *International Journal of Biological Macromolecules*, **221**, 986-993. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.002>
- [45] 高嘉祥, 靳昕怡, 肖杨, 等. 环氧树脂的阻燃改性研究进展[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2022, 42(4): 83-91.
- [46] 杨小龙, 申爱琴, 蒋宜馨, 等. 基于阻燃抑烟的纳米黏土改性沥青综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 42-61.
- [47] Xiao, F., Guo, R. and Wang, J. (2019) Flame Retardant and Its Influence on the Performance of Asphalt—A Review. *Construction and Building Materials*, **212**, 841-861. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.118>
- [48] 王超, 陆海梅, 等. 木质素基膨胀阻燃剂的制备及其在硬质聚氨酯泡沫中的阻燃机理[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(9): 119-125.
- [49] 呼微, 赵晓杰, 刘昱含, 等. 新型木质素基阻燃剂在聚氨酯泡沫中的应用[J]. 长春工业大学学报, 2024, 45(4): 313-321.
- [50] Yang, H., Qin, Y., Liang, D., Lu, X. and Gu, X. (2023) Preparation of a Novel Flame Retardant Based on Phosphorus/Nitrogen Modified Lignin with Metal-organic Framework and Its Application in Epoxy Resin. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **148**, 12845-12857. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12578-3>
- [51] Li, J., He, Z., Yu, L., He, L. and Shen, Z. (2021) Multi-objective Optimization and Performance Characterization of Asphalt Modified by Nanocomposite Flame-Retardant Based on Response Surface Methodology. *Materials*, **14**, 4367. <https://doi.org/10.3390/ma14164367>
- [52] 李晓超, 刘圣洁, 曾俐豪, 等. 沥青复合阻燃抑烟剂的作用效果与协同机理[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(4): 320-326.
- [53] Chen, R., Zhao, R., Liu, Y., Xi, Z., Cai, J., Zhang, J., *et al.* (2021) Development of Eco-Friendly Fire-Retarded Warm-Mix Epoxy Asphalt Binders Using Reactive Polymeric Flame Retardants for Road Tunnel Pavements. *Construction and Building Materials*, **284**, 122752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122752>
- [54] Zhang, W., Liu, S., Sun, Q., Tian, N. and Wu, Z. (2023) Synthesis of Covalent Organic Framework Materials and Their Application in the Field of Sensing. *Nano Research*, **17**, 162-195. <https://doi.org/10.1007/s12274-023-6027-x>
- [55] 熊剑平, 彭文举, 陈宇, 等. 基于热分析的阻燃沥青阻燃机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 47-56.
- [56] 路建强, 杜傲伟, 柳伟, 等. 两种沥青路面阻燃剂的阻燃效果研究[J]. 有色金属材料与工程, 2023, 44(1): 75-84.
- [57] 赵毅, 田玉峰, 郝增恒, 等. 隧道沥青路面阻燃抑烟技术及机理研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(5): 1430-1438.
- [58] Jokic, M., Zhang, J. and Kabir, I.I. (2025) Polymer-based Flame-Retardant Asphalt: A Comprehensive Review of Materials, Performance, and Evaluation Methods. *Polymers*, **17**, Article 3272. <https://doi.org/10.3390/polym17243272>
- [59] Sun, X., Zhao, Z., Xu, C., Hao, M., Bussemaker, M., Liu, L.X., *et al.* (2026) Reactive Nitrogen-boron Polyols for Flame-Retardant and Low-Smoke Rigid Polyurethane Foams. *Reactive and Functional Polymers*, **221**, Article 106641. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2026.106641>
- [60] 陆海梅, 王超, 王洪坤, 等. 全组分微纳化木质纤维素基聚磷酸铵阻燃剂的制备及在纸张中的应用[J]. 材料导报,

2023, 37(10): 58-65.

- [61] 王建祺. 无卤阻燃聚合物基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [62] Wei, T., Yang, X., Huo, Y., Jia, X., Shan, W. and Wang, W. (2022) Lignin/Ammonium Polyphosphate-Modified Wood Flour/High-Density Polyethylene Composites. *Materials Chemistry and Physics*, **290**, 126594. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126594>.
- [63] 贾晓军, 申爱琴, 王超, 等. 氢氧化铝/有机改性蒙脱土复合改性沥青性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(12): 4167-4177.
- [64] 汤智杰, 王路生. 温拌剂对氢氧化铝(ATH)/有机改性蒙脱土(OMMT)沥青混合料阻燃抑烟与路用性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(5): 799-805, 859.
- [65] Tan, Y., He, Z., Li, X., Jiang, B., Li, J. and Zhang, Y. (2020) Research on the Flame Retardancy Properties and Mechanism of Modified Asphalt with Halloysite Nanotubes and Conventional Flame Retardant. *Materials*, **13**, Article 4509. <https://doi.org/10.3390/ma13204509>.
- [66] Abniki, M., Rahmani, Z., Soleimani-Gorgani, A. and Shirkavand Hadavand, B. (2025) Recent Advances in Green Flame Retardant Compounds for Application in Polymers: A Review. *Polymers from Renewable Resources*, **16**, 209-243. <https://doi.org/10.1177/20412479251345678>
- [67] Yang, H., Yu, B., Xu, X., Bourbigot, S., Wang, H. and Song, P. (2020) Lignin-derived Bio-Based Flame Retardants toward High-Performance Sustainable Polymeric Materials. *Green Chemistry*, **22**, 2129-2161. <https://doi.org/10.1039/d0gc00449a>.
- [68] 吴伟飞, 李玉环, 徐松, 等. Mg-AlLDHs 改性沥青的制备与抗老化性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(4): 5.
- [69] Yang, X., Shen, A., Liang, M., Jiang, Y. and Meng, Y. (2021) Dynamic Flame Retardancy and Flame Mechanism of SBS-Modified Asphalt Containing Alumina Trihydrate and Organic Montmorillonite. *Construction and Building Materials*, **309**, Article ID: 125077. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125077>
- [70] 杨群, 李望瑞. 沥青阻燃性能的评价方法与性能研究[J]. 建筑材料学报, 2008(4): 431-434.
- [71] 黄晓明, 吴少鹏, 赵永利. 沥青与沥青混合料[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.
- [72] Wang, S., Cheng, D. and Xiao, F. (2017) Recent Developments in the Application of Chemical Approaches to Rubberized Asphalt. *Construction and Building Materials*, **131**, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.077>
- [73] 贺孟霜. 道路石油沥青结构行为与性能表征[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [74] Zhao, H., Cao, Y., Sit, S.P., Lineberry, Q. and Pan, W. (2011) Thermal Characteristics of Bitumen Pyrolysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **107**, 541-547. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1590-x>
- [75] 赵洁雯, 黄晓明, 李晓东. 基于热重质谱联用的沥青质燃烧特性分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(1): 178-182.
- [76] 马峰, 富志鹏, 沙爱民, 等. 天然沥青改性沥青热性质与微观结构研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(6): 12-17.
- [77] 马峰, 傅珍, 沙爱民. 基于热分析质谱联用技术的沥青老化机理研究[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(6): 7-12.
- [78] Hao, J., Che, Y., Tian, Y., Li, D., Zhang, J. and Qiao, Y. (2017) Thermal Cracking Characteristics and Kinetics of Oil Sand Bitumen and Its SARA Fractions by TG-FTIR. *Energy & Fuels*, **31**, 1295-1309. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02598>
- [79] 何立平, 申爱琴, 梁军林, 等. 阻燃沥青及沥青混合料的阻燃性能及路用性能[J]. 公路交通科技, 2013, 30(12): 15-22.
- [80] 刘细军, 许涛. 氢氧化镁阻燃沥青热解特性及动力学分析[J]. 公路, 2021, 66(12): 341-347.
- [81] 王俊天. 隧道温拌阻燃沥青混合料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2021.
- [82] 李梦林. LDHs/氢氧化物复合改性沥青阻燃性能与机理研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [83] Eberhardsteiner, L., Füssl, J., Hofko, B., Handle, F., Hospodka, M., Blab, R., et al. (2015) Towards a Microstructural Model of Bitumen Ageing Behaviour. *International Journal of Pavement Engineering*, **16**, 939-949. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.993192>
- [84] 刘圣洁, 林钰, 李梦然, 等. 基于 MSCR 试验的温拌阻燃沥青高温性能评价与分级[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 142-147.