

橡胶改性沥青对高速公路噪声抑制性能的影响研究

郑世勇

重庆交通建设（集团）有限公司，重庆 401120

DOI: 10.61369/ME.2024070027

摘要：随着高速公路建设的加速，交通噪声污染问题日益严重。橡胶改性沥青因其优异的弹性、空隙结构及声学特性，在道路降噪方面展现出显著优势。本文从材料微观结构、力学行为、孔隙特性及声波传播机制等方面，系统分析了橡胶改性沥青在噪声抑制中的作用机理。橡胶颗粒的加入有助于构建多孔骨架结构，增强对中高频声波的散射和吸收，显著提升路面降噪性能。通过优化掺量、粒径、空隙率及结构组合，橡胶改性沥青在噪声控制、环境适应性及可持续性方面具备广阔应用前景。

关键词：橡胶改性沥青；高速公路；交通噪声；噪声抑制；声学性能

Research on the Influence of Rubber Modified Asphalt on the Noise Suppression Performance of Expressways

Zheng Shiyong

Chongqing Transportation Construction (Group) Co., LTD. Chongqing 401120

Abstract： With the acceleration of expressway construction, the problem of traffic noise pollution is becoming increasingly serious. Rubber-modified asphalt has shown significant advantages in road noise reduction due to its excellent elasticity, void structure and acoustic properties. This paper systematically analyzes the mechanism of rubber-modified asphalt in noise suppression from the aspects of material microstructure, mechanical behavior, pore characteristics and sound wave propagation mechanism. The addition of rubber particles helps to construct a porous skeleton structure, enhancing the scattering and absorption of medium and high-frequency sound waves, and significantly improving the noise reduction performance of the pavement. By optimizing the dosage, particle size, void ratio and structural combination, rubber-modified asphalt has broad application prospects in noise control, environmental adaptability and sustainability.

Keywords： rubber modified asphalt; expressway; traffic noise; noise suppression; acoustic performance

引言

随着高速公路网络的快速扩展，交通噪声已成为主要的环境污染源之一，尤其在高速、大流量条件下更为突出。传统降噪手段如声屏障和绿化带存在成本高、适用性差等限制，难以满足日益增长的噪声控制需求^[1]。因此，从路面材料出发，通过材料结构优化实现源头降噪，成为当前研究的关键方向。橡胶改性沥青作为将废旧轮胎橡胶粉引入热沥青中的复合材料，兼具良好的弹性、吸能能力与空隙结构特征，在抑制交通噪声方面展现出独特优势。其微观结构有助于声波能量的多路径耗散与频谱调节，材料的粘弹特性亦强化了振动能量的内部转化与衰减效应。本文从微结构特性、力学性能、孔隙参数与声学响应机制等方面，系统探讨橡胶改性沥青的降噪机理，分析其配比设计与结构控制对声学表现的影响，以期为绿色道路建设和低噪交通系统提供材料支撑与理论依据。

一、橡胶改性沥青材料的结构与性能基础

（一）材料微结构变化

橡胶改性沥青是一种典型的两相复合体系，橡胶颗粒在沥青基质中形成分散态结构。经高温剪切后，橡胶粒子与基质沥青发生物理混合与部分化学交联，形成具有空间网络特征的复合体。橡胶颗粒的溶胀作用促使其表面与沥青相互渗透，从而在微观尺

度上形成类似多级结构的相互嵌套网络。这一结构特征显著提升材料的整体均质性与内聚性，并在声学负荷作用下提供有效的能量耗散通道。

（二）力学性能改进

橡胶改性沥青的力学行为主要受控于橡胶的弹性回复能力和多尺度相界特征。在反复载荷作用下，改性材料能够保持较低的永久变形速率与裂纹扩展倾向。沥青基体因橡胶的加入而表现出

更高的剪切模量和抗疲劳寿命，同时在剪切变形过程中形成延迟屈服机制，从而降低微裂纹形成速率^[2]。其高温下的流动临界温度上升，抗车辙能力增强，低温下的断裂应变范围扩大，脆裂风险明显降低。

（三）空隙率与材料吸音性

在橡胶改性沥青混合料中，橡胶颗粒间的“骨架-填充”结构促使材料在压实过程中保留部分开放式孔隙结构，形成高孔隙率的非连续相通道。这种孔隙体系不仅影响材料的密实度，还对声波传输路径和衰减机制起决定性作用。声波进入孔隙后发生多次散射与黏滞耗散，降低能量传递效率。材料中空隙的尺度、连通性和分布均匀性是决定其吸音性能的关键因素，开口孔隙率越高，对中高频段噪声的衰减能力越强。与密实型沥青相比，该类材料在1~4 kHz频率范围内具有更优的声能耗散能力。

二、橡胶改性沥青的声学机理分析

（一）多孔结构引导的声波散射与能量耗散

橡胶改性沥青中形成的开口型孔隙结构构成了复杂的非连续声传播介质，声波在穿越孔隙网络时被迫改变传播方向并在多次界面反射中逐渐衰减。孔壁之间的结构不规则性和孔径尺度的多样性增强了散射强度，使声能在多路径折返中快速衰弱。在中高频段，声波波长接近孔隙尺度，更容易被激发共振与模式转换，从而形成有效的吸声带宽^[3]。此外，部分孔隙通道具有局部封闭或颈部约束特征，增强了驻波形成与声能局部滞留的效应，进一步促进能量耗散。

（二）材料内阻尼主导的热转化损耗机制

橡胶分子链具有显著的粘弹性，其对外部激励响应过程中伴随大量分子间摩擦与链段运动失配，表现为高内阻尼特性。当声波以振动形式加载至材料体系中，橡胶相的分子结构对振动能量产生强烈吸收，部分声能在链段内部转化为热能释放，构成典型的粘滞耗散过程。该耗散机制对频率变化不敏感，能够在较宽频带内维持稳定衰减特性。与刚性矿质骨料为主的传统沥青结构相比，橡胶改性系统在应变响应过程中具有更强的振动衰减能力，显著增强了其噪声控制能力。

（三）声阻抗调节对反射衰减的作用机制

声波在传播过程中遇到不同介质界面会发生反射与透射，其反射强度取决于声阻抗差异。橡胶改性沥青通过调节材料的整体密度与弹性模量，有效控制其声阻抗值，使之更接近空气的声阻抗范围，减小声波入射时的反射系数。在声波由空气进入路面结构的界面，其匹配程度越高，越容易将声能导入材料内部进行耗散。通过引入柔性橡胶相，使界面由硬反射边界转化为部分吸收边界，从而降低声波反弹回环境的能量比例，有效缓解近距离噪声扩散。

（四）频谱选择性吸收与“滚动噪声”衰减特性

车辆轮胎与路面之间的相互作用产生以500 Hz至2500 Hz为主频的滚动噪声，此类中高频波动能量集中，传播速度快，传播范围广。橡胶改性沥青在该频率区间表现出优异的频谱选择性吸

收能力。其开口孔隙结构对中频声波具有高散射能力，而弹性橡胶相对对频率波动敏感，易引发材料内部的振动模式响应，形成匹配的阻尼带宽，产生选择性声能捕获效应。通过精细调控粒径分布与孔隙率，可实现对特定频段噪声的精确调控，达到主动控制滚动噪声的目的。

三、橡胶改性沥青混合料的配比与结构优化对噪声性能的影响

（一）橡胶掺量与粒径分布

橡胶掺量是影响改性沥青声学性能的核心变量。橡胶粉末在沥青体系中不仅作为弹性组分参与应力调节，还决定了混合料的孔隙结构和能量耗散能力。掺量在10%至20%范围内，材料表现出良好的粘弹响应特性和孔隙生成能力，既能维持必要的结构稳定性，又能为声波传播提供多级散射通道。掺量不足导致孔隙度偏低，声波路径短，吸音效率下降；掺量过高则引发粘度急剧上升，拌合与摊铺困难，孔隙结构易塌陷。粒径分布控制直接影响声波共振匹配，细颗粒有利于填充微孔，增强高频吸收，而1 mm左右的中粒径橡胶则在中频段形成良好的结构响应，提升滚动噪声的抑制效率^[4]。统一粒径控制范围和形态参数，有助于提高混合料的均匀性和长期性能稳定性。

（二）空隙结构控制

空隙结构作为决定性参数，控制着混合料对声波的传输、衰减与反射路径。橡胶改性沥青中常采用开级配设计，以构建连通性强、结构层次丰富的孔隙网络。整体空隙率应控制在18%至22%，以平衡力学强度与声学性能。开口孔隙的数量、尺度和分布状态决定了声波在材料中的传播效率和吸收能力。非连通性孔隙虽然能提供一定的声能捕获，但其贡献局限于局部驻波区。通透性良好的连续孔隙通道则使得声波在入射后持续发生黏滞摩擦和热损耗，提高整体吸收效率。材料压实过程中的骨架稳定性和橡胶粒子的分布状态直接影响孔隙保持能力，因此需结合沥青黏度调控与压实能量管理，以确保结构完整性不被破坏。

（三）添加剂与共改性方法

橡胶改性体系可通过引入协同组分进一步优化性能，实现多目标功能集成。SBS（苯乙烯-丁二烯-苯乙烯）作为热塑性弹性体，可与橡胶粉共同参与粘结网络构建，提高复合材料的热稳定性与结构柔韧性。纳米硅粉等无机功能材料通过填充微孔、增强界面相互作用，有效提升孔隙结构的稳定性和吸声通带范围。多元共改性能够使材料在低频至高频段形成多个吸收峰，拓宽其声能耗散频谱。不同添加剂之间的协同效应取决于其粒径尺度、界面相容性以及分布均匀性，在配比设计中应充分考虑改性剂的物理耦合特性与化学稳定性，以实现材料力学与声学性能的耦合最优。

（四）路面层厚度与结构组合

面层厚度是影响声波入射响应和吸能深度的重要参数。在3 cm至5 cm厚度区间内，橡胶改性沥青能够有效吸收常见交通噪声频段内的声波能量。较薄面层可能不足以形成完整的声波耗散路

径，而过厚则可能引发结构分层和剪切失稳等问题。与基层结构的耦合组合是提升降噪性能的关键技术路径。当改性沥青与低模量底层形成复合吸声体系时，声波在多层结构中形成多重反射与延迟衰减效应，声能在结构内部驻留时间延长，耗散机制更为充分。结构层的弹性模量梯度设计和各层之间的粘结性能需满足整体动载下的稳定需求，防止因界面脱粘而导致声学性能下降与结构寿命缩短。

四、高速公路应用中的环境适应性与长期性能分析

（一）环境耐久性

橡胶改性沥青在复杂交通与气候环境中需承受长期的温度循环、水分浸泡、紫外老化以及荷载冲击等多重应力作用。其内部橡胶相具有优异的弹性恢复能力，能有效缓解热胀冷缩引发的结构疲劳，抑制因温差引起的微裂纹萌生与扩展。材料的微观交联网络结构提升了其抗氧化性能，降低紫外线诱发的基质老化速度，维持其热稳定性与力学完整性。在高温高湿地区，该类材料对降雨冲刷及水分渗透的抵抗能力明显优于传统沥青层，水稳定性参数表现稳定，有助于保持孔隙结构的完整性与吸声功能的持续性。

（二）噪声性能的持久性

橡胶改性沥青的声学性能主要依赖其空隙率、连通性和橡胶粒子分布状态，这些结构特征随使用年限而发生变化。交通荷载反复作用导致孔隙边界结构逐渐压实，粉尘和颗粒物易在孔隙入口处堆积，造成吸声路径阻塞。声波在结构中传播路径缩短，黏滞损耗机制效率下降，声波反射与远距传播增强，降噪效能逐步减弱。维持良好的吸声性能需通过结构自洁设计与周期性养护干预，控制堵塞速度与频率^[5]。橡胶相对压缩变形具有缓冲功能，可延迟孔隙压塌与连通性丧失，保证材料长期吸声特性不出现突变式退化。

（三）施工与养护适应性

橡胶改性沥青对拌合温度与时间敏感度较高，适宜的热剪切工艺可实现橡胶颗粒充分分散与预溶胀状态，提高混合均匀性与结构稳定性。该材料体系在施工过程中对摊铺速度与碾压工艺要

求严格，需控制压实能量与温度窗口，确保形成目标空隙率与路面平整度。与常规热拌沥青技术体系兼容性较好，可通过现有设备完成高效铺装，具备规模化工程推广能力。其表面层结构具备优良的摩擦系数与轮胎接触性能，满足高速重载环境对抗滑性能与行驶安全性的综合要求。在养护阶段，适用于高压清洗与表层疏水处理，可有效恢复孔隙通透性并延缓老化进程。

（四）环境友好性与可持续利用潜力

橡胶改性沥青采用废旧轮胎粉作为核心组分，在实现道路结构功能提升的同时实现资源再生利用，显著降低道路建材对原生资源的依赖。废橡胶中高聚物组分在热处理过程中参与沥青网络构建，赋予路面新的粘弹行为，增强其使用性能。改性过程中未引入有毒挥发性化学添加剂，热拌过程排放控制在可接受范围内，符合当前低碳建造与绿色交通发展导向。橡胶颗粒的稳定性高，不易迁移或降解，不会对土壤和地下水造成二次污染，具备良好的环境相容性。在生命周期评价中，该类材料表现出更低的碳排放系数与更长的服务周期，支撑高速公路路面从一次性建设向低维护、高性能转型。

五、结语

橡胶改性沥青凭借其独特的微观结构与优异的粘弹特性，在提升高速公路路面噪声抑制性能方面展现出显著优势。橡胶颗粒的引入不仅改善了沥青混合料的空隙结构和力学性能，还有效增强了材料对中高频交通噪声的吸收与散射能力。多孔骨架提供了丰富的声能耗散路径，柔性相的阻尼作用强化了振动能量的热转化，材料的声阻抗特性进一步促进了声波的导入与衰减。合理控制橡胶掺量、粒径分布和空隙率参数，并结合共改性技术与多层结构设计，可实现对滚动噪声的频谱选择性控制，同时兼顾力学稳定性与环境耐久性。在长期服役与复杂工况下仍保持良好声学性能的能力，使其具备实际推广价值与工程应用潜力。未来，橡胶改性沥青将在智能道路、低碳建造与功能材料融合等多维技术路径中持续拓展应用边界，推动高速公路路面向绿色、静音与高性能方向加速演进。

参考文献

- [1] 马辉. 橡胶粉/芳烃油改性沥青对高速路面的降噪与吸声性能试验 [J]. 粘接, 2023, 50(11): 17-21.
- [2] 方淑艳. 橡胶颗粒改性沥青阻尼降噪性能研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(03): 1-3+8.
- [3] 李凯顺. 温度对橡胶颗粒沥青混合料阻尼降噪的影响分析 [D]. 内蒙古农业大学, 2023.
- [4] 黄浩. 橡胶改性沥青路面降噪技术研究进展 [J]. 现代交通技术, 2024, 21(01): 28-33.
- [5] 方淑艳. 橡胶颗粒改性沥青阻尼降噪性能研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(03): 1-3+8.