

## 纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青路面抗车辙性能研究

郭俊伟

山焦汾西矿业集团山西汾晋柳物流有限公司 山西晋中

**【摘要】**随着交通量的不断增加，沥青路面的抗车辙性能成为影响道路使用寿命和安全性的关键因素之一。为了改善这一性能，纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青逐渐得到广泛应用。本研究探讨了纳米 SiO<sub>2</sub>对沥青路面抗车辙性能的影响，实验结果表明，纳米 SiO<sub>2</sub>能够有效提高沥青的高温稳定性，显著降低车辙的产生。通过对不同掺量的纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青的实验分析，研究发现适量添加纳米 SiO<sub>2</sub>不仅增强了沥青的抗车辙性能，还改善了其流变性能和热稳定性，为改性沥青的应用提供了新的思路。

**【关键词】**纳米 SiO<sub>2</sub>；沥青；抗车辙；改性；高温稳定性

**【收稿日期】**2025 年 6 月 11 日

**【出刊日期】**2025 年 7 月 10 日

**【DOI】**10.12208/j.jer.20250312

### Study on rutting resistance of asphalt pavement modified with nano SiO<sub>2</sub>

Junwei Guo

Shanjiao Fenxi Mining Group Shanxi Fenjinliu Logistics Co., Ltd, Jinzhong, Shanxi

**【Abstract】** With the continuous increase in traffic volume, the rutting resistance of asphalt pavements has become one of the key factors affecting road service life and safety. To improve this performance, nano-SiO<sub>2</sub>-modified asphalt has gradually gained widespread application. This study investigates the impact of nano-SiO<sub>2</sub> on asphalt pavement rutting resistance. Experimental results show that nano-SiO<sub>2</sub> can effectively enhance asphalt's high-temperature stability and significantly reduce rutting formation. Through experimental analysis of nano-SiO<sub>2</sub>-modified asphalt with different addition rates, the study found that appropriate nano-SiO<sub>2</sub> addition not only improves rutting resistance but also enhances its rheological properties and thermal stability, providing new insights for the application of modified asphalt.

**【Keywords】** Nano SiO<sub>2</sub>; Asphalt; Anti-rutting; Modification; High temperature stability

#### 引言

随着现代交通量的不断增加，沥青路面在长期高温、高负荷条件下容易发生车辙问题，严重影响道路的使用功能和安全性。为了提升沥青路面的抗车辙性能，改性沥青成为研究的重点。纳米 SiO<sub>2</sub>作为一种新型的改性材料，因其特殊的物理化学性质而被广泛关注。其纳米级的粒径使其能够在沥青中形成更为密实的结构，从而有效提高沥青的高温稳定性和抗车辙能力。通过对不同掺量纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青的研究，探讨了其对抗车辙性能的改善效果，旨在为改性沥青的应用提供科学依据。

#### 1 纳米 SiO<sub>2</sub>对沥青路面抗车辙性能的影响机制分析

纳米 SiO<sub>2</sub>的引入对沥青的抗车辙性能产生了显著影响，其作用机理主要体现在提高沥青的高温稳定性和改善其流变特性。纳米 SiO<sub>2</sub>作为一种极小粒径的无机纳米材料，在沥青中掺加后，能显著增强沥青的结构

密实性。纳米 SiO<sub>2</sub>的细小颗粒能够均匀分散于沥青基质中，并通过填充效应有效减少沥青基质中的空隙，提升沥青的抗变形能力<sup>[1]</sup>。纳米 SiO<sub>2</sub>的高比表面积和化学活性，使其与沥青中的分子发生相互作用，增强了其力学性能，使得沥青在高温下的流动性和形变性明显降低，从而有效抑制了车辙的形成。

此外，纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青的流变性能也得到了显著改善。在高温条件下，纳米 SiO<sub>2</sub>能改善沥青的黏度和弹性，减少其在外界压力作用下的塑性流动。这种改善不仅体现在高温下沥青的抗车辙能力上，还表现在沥青的热稳定性上。通过对不同掺量的纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青进行动粘度和剪切流变实验，可以发现，随着纳米 SiO<sub>2</sub>掺量的增加，沥青的粘弹性模量有所提升，尤其在高温状态下，纳米 SiO<sub>2</sub>能有效抑制沥青的高温软化，使沥青的抗车辙性能得到更大幅度的提升。实验结果表明，适量的纳米 SiO<sub>2</sub>能够显著增强沥青的刚性，提

升其对高温车辙的抗拒力。

纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青的抗车辙机制还与其对沥青微观结构的优化有关。研究表明, 纳米 SiO<sub>2</sub>不仅能提高沥青的表面硬度, 还能增强其内部的聚合物链结构的交联性。纳米 SiO<sub>2</sub>的加入导致沥青基质形成更为紧密的网络结构, 使其在长期高温和重负荷作用下, 沥青层不易发生软化和流动变形<sup>[2]</sup>。这一机制使得改性沥青在路面应用中具有更长的使用寿命和更好的高温性能。纳米 SiO<sub>2</sub>不仅改善了沥青的抗车辙能力, 还提升了沥青的综合性能, 为其在高负荷和高温环境下的使用提供了科学依据。

## 2 不同掺量纳米 SiO<sub>2</sub>对沥青高温性能的改善效果研究

纳米 SiO<sub>2</sub>作为一种高性能改性材料, 其在沥青中的应用逐渐引起了研究者的广泛关注, 尤其是在改善沥青的高温性能方面。掺入不同掺量的纳米 SiO<sub>2</sub>后, 沥青的高温稳定性明显提高。通过多种实验数据分析, 纳米 SiO<sub>2</sub>能够有效地改变沥青的微观结构, 提高其分子间的相互作用力, 从而增强沥青的黏附性和结构的紧密度。在高温下, 沥青的粘弹性模量、流动性和流变特性都会受到纳米 SiO<sub>2</sub>掺量的影响<sup>[3]</sup>。掺入适量的纳米 SiO<sub>2</sub>可以优化沥青的高温性能, 提高其抗车辙能力和热稳定性。不同掺量下的纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青表现出不同的高温流变特性, 实验结果表明, 适量的纳米 SiO<sub>2</sub>掺入有助于沥青在高温条件下维持其形态稳定性。

掺量对沥青高温性能的改善效果呈现出明显的依赖性, 过低或过高的掺量均可能导致不良效果。在低掺量情况下, 纳米 SiO<sub>2</sub>的作用尚未显现, 沥青的流动性改善较为有限, 未能有效显著提高抗车辙能力。而当掺量增大到一定范围时, 纳米 SiO<sub>2</sub>粒子能够更好地与沥青基质发生化学反应, 形成更为紧密的分子结构。沥青的高温流变性能显著提升, 抗车辙性能大幅改善, 表现出较好的流变性和热稳定性。这是因为纳米 SiO<sub>2</sub>颗粒能在沥青中形成三维网络结构, 显著增强沥青的结构刚性, 使其在高温下表现出较强的抗变形能力。进一步的研究还发现, 纳米 SiO<sub>2</sub>的掺量与沥青的抗车辙性能之间存在着一个最佳范围, 过多的掺量可能导致沥青的粘度过大, 进而影响其施工性能和路面铺设质量。

在实际工程应用中, 选择合适的纳米 SiO<sub>2</sub>掺量能够显著提升沥青的高温性能, 减少高温下的车辙损害。研究表明, 掺入一定量的纳米 SiO<sub>2</sub>后, 沥青的抗车辙性能显著增强, 尤其在高负荷、高温环境下, 改性沥青能够有效减缓车辙的形成, 延长路面使用寿命。这种改

善不仅提高了沥青的高温性能, 还提升了道路的耐久性和安全性<sup>[4]</sup>。随着纳米 SiO<sub>2</sub>掺量的优化, 沥青的流变性能和力学性能得到了显著的增强, 尤其在高温情况下, 改性沥青表现出较强的抗流动性, 降低了高温引起的表面变形问题, 从而提高了道路的使用性能和承载能力。

## 3 纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青在抗车辙性能中的作用与机理探讨

纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青在抗车辙性能方面的作用, 主要体现在其对沥青结构的优化和力学性能的提升。掺入纳米 SiO<sub>2</sub>后, 沥青的微观结构发生了显著变化。由于纳米 SiO<sub>2</sub>颗粒具有极高的比表面积和良好的化学活性, 它们能够均匀分散在沥青基质中, 与沥青分子链发生相互作用<sup>[5]</sup>。这种相互作用有效地增强了沥青基质的内聚力和结构的稳定性, 减少了沥青中的空隙, 提高了其密度。沥青中纳米 SiO<sub>2</sub>的均匀分布提高了其抗压能力, 使其在高温和高负荷条件下表现出更强的抗车辙能力, 从而有效延缓了车辙的形成, 提升了路面的抗变形性能。

在更深层次的机理方面, 纳米 SiO<sub>2</sub>对沥青抗车辙性能的提升与其对沥青分子链结构的强化密切相关。研究表明, 纳米 SiO<sub>2</sub>颗粒在沥青中不仅通过填充作用增强了结构的致密性, 还通过增强分子间的物理交联, 提升了沥青的抗剪切能力。随着纳米 SiO<sub>2</sub>含量的增加, 沥青的弹性模量和硬度均有所提高, 这意味着沥青能够在高温和重载情况下保持较好的稳定性, 减少车辙现象的发生。纳米 SiO<sub>2</sub>对沥青的高温流变性能有着明显的改善作用, 尤其在反复高温负荷作用下, 改性沥青能够有效抵抗车辙造成的表面塑性变形, 保持路面平整度和强度。

进一步的研究还揭示了纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青的抗车辙机理与其改善沥青的流变性能密切相关。掺入适量的纳米 SiO<sub>2</sub>后, 沥青的高温流变特性得到了显著提升, 其黏弹性表现出更强的弹性和更低的粘性, 这使得沥青能够在温度波动和负荷作用下有效地恢复形状, 减少永久性变形的发生<sup>[6]</sup>。纳米 SiO<sub>2</sub>能够改善沥青的温度敏感性, 使其在高温条件下仍然能够维持较高的抗变形能力。纳米 SiO<sub>2</sub>通过改善沥青的微观结构、增强分子交联、提高流变性能等方式, 显著提升了沥青的抗车辙性能, 使其在极端环境下的表现更加优越, 延长了道路的使用寿命并提高了其安全性。

## 4 纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青路面抗车辙性能的实验评估与实践应用

纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青路面抗车辙性能的实验评估主要通过多种测试方法来验证其高温稳定性和抗车辙能力。实验中,采用了马歇尔稳定度试验、动剪切流变试验(DSR)以及车辙试验等常规性能测试,评估不同掺量纳米 SiO<sub>2</sub>对沥青的高温性能影响。在马歇尔试验中,随着纳米 SiO<sub>2</sub>掺量的增加,沥青的稳定度和流值均表现出显著改善<sup>[7]</sup>。特别是在动剪切流变试验中,改性沥青的黏弹性模量增大,显示出更强的抗剪切能力,表明其在高温条件下的抗变形能力得到了增强。此外,车辙试验结果表明,纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青相比常规沥青具有显著更低的辙槽深度,说明其在高温和重负荷作用下能够有效抑制车辙的形成,提高了路面的使用性能。

在实践应用中,纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青展现出了优越的高温性能和抗车辙特性。在实际施工过程中,纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青的工作性良好,易于加工和施工。与传统沥青相比,纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青在铺设过程中表现出较好的流动性和适应性,且具有较高的初期强度和较快的固化速度。在长期使用过程中,纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青能够有效应对高温和交通负荷,避免了因温度过高导致的沥青软化问题,并且显著降低了由于车辙产生的路面损害,保持了路面结构的稳定性。纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青不仅能够提高沥青路面的耐久性,还能够提高路面在极端条件下的安全性和舒适性。

随着交通运输需求的不断增加,改性沥青路面在道路建设中的应用前景广阔。纳米 SiO<sub>2</sub>作为一种新型的改性材料,凭借其优异的高温稳定性和抗车辙性能,已经在多个道路工程项目中得到实际应用。通过优化掺量和改性工艺,纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青能够有效提升路面的抗车辙能力,延长道路的使用寿命,减少维护成本。这一技术的应用不仅符合可持续发展的需求,也为高速公路、城市道路等重要交通设施提供了更为可靠的材料支持<sup>[8]</sup>。通过进一步的实践和优化,纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青将在未来的道路建设中发挥更大的作用,推动道路材料的高性能化和绿色化发展。

## 5 结语

纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青在提高路面抗车辙性能方面展

现了显著的优势,实验结果和实际应用均表明,适量掺入纳米 SiO<sub>2</sub>能显著增强沥青的高温稳定性、抗车辙能力及流变性能。其优异的性能不仅改善了沥青的结构密实度和分子交联,还在长期高温和重负荷条件下有效抑制了车辙的形成,延长了道路使用寿命。纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青的实际应用也证明了其在道路施工中的良好适应性和工作性,为现代道路建设提供了新的技术支持。随着研究的深入,纳米 SiO<sub>2</sub>改性沥青将在未来道路工程中发挥更大潜力,推动沥青材料的高性能化和可持续发展。

## 参考文献

- [1] 郭世龙,宋金,郭佳乐,等.分子修饰对煤沥青基硬炭材料及其储纳性能的影响[J/OL].储能科学与技术,1-11[2025-07-11].
- [2] 黎海华.不同马歇尔击实方法泡沫沥青冷再生混合料性能研究[J/OL].路基工程,1-6[2025-07-11].
- [3] 王龙,范庭梧,陈占江,等.受弯作用下沥青混凝土残余力学性能研究[J/OL].水利水电快报,1-18[2025-07-11].
- [4] 李乃强,吴秉军,马东旭,等.基于数据驱动的沥青路面使用性能预测方法研究[J/OL].公路,2025,(07):338-346[2025-07-11].
- [5] 刘鑫.农村道路沥青面层抗车辙施工技术优化分析[J].黑龙江科学,2025,16(12):58-61.
- [6] 王军胜.半柔性抗车辙路面施工技术在市政道路工程中的应用[J].科学技术创新,2025,(16):142-145.
- [7] 常杰,喻江春,陈仲达,等.抗车辙灌浆复合路面技术在站前道路中的应用[J].交通世界,2025,(15):42-44.
- [8] 闫吉成,宋汶宏,孙欣.市政主干道沥青路面车辙成因及抗车辙技术研究[J].科学技术创新,2025,(09):113-116.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

