

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.01.011

# 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青高温性能研究<sup>\*</sup>

王云

(云南建投路面工程有限公司, 云南 昆明 650032)

**摘要:** 将纳米 SiO<sub>2</sub> 作为乳化剂制备纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青, 通过软化点和针入度试验、差热分析、动态剪切流变试验分析纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的蒸发残留物高温热性能和高温流变性能, 结合微观机制研究纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的高温稳定性能。结果表明, 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的高温稳定性比基质沥青和普通乳化沥青明显提高, 能弥补普通乳化沥青高温稳定性差的不足, 具有良好应用前景。

**关键词:** 公路; 乳化沥青; 纳米 SiO<sub>2</sub>; 高温稳定性

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)01-0065-03

随着交通量的迅猛增加, 对沥青路面质量的要求提高, 普通乳化沥青已无法满足需求, 亟待优化升级。目前 SBR 改性乳化沥青应用较普遍, 其路用性能虽然优于普通乳化沥青和普通沥青, 但高温性能不太理想, 软化点一般低于 60 ℃, 易造成路面大面积早期损坏, 已不能满足现代交通的要求<sup>[1-3]</sup>。刘悦、马秀良、CHEN Z. Q.、栾轶博等利用 Pickering 乳液形成机制, 经过多次尝试, 借助经缩聚物改性后的纳米 SiO<sub>2</sub> 微粒, 创造性地制备出新型 Pickering 乳化沥青<sup>[4-7]</sup>, 该沥青具有良好的储存稳定性。他们主要研究了 Pickering 乳化沥青的制备效果和稳定性, 未分析其高温性能。本文研究纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的高温稳定性。

## 1 试验方案

### 1.1 原材料及试验设备

原材料: 平均粒径 28 nm 的纳米 SiO<sub>2</sub>; 缩聚物; 十六烷基三甲基溴化铵; 盐酸; 蒸馏水。

试验设备: 恒温磁力搅拌器; 扫描电子显微镜; 光学显微镜; Thermofisher Nicolet 6700 红外光谱仪; JJO-2 接触角测定仪; Malvern ZS90; 立式胶体磨; 烘箱; 1.18 mm 细筛; 三口烧瓶; 温度计; 储存稳定性试验管; 试管; 电子分析天平; 滴管; 烧杯。

### 1.2 试样制备

#### 1.2.1 乳化剂制备

按照 5%、10%、15%、20%、25% 的比例称取缩聚物和十六烷基三甲基溴化铵, 分别添加纳米 SiO<sub>2</sub>

进行表面改性; 取 200 g 水(去离子水), 掺入 12.5% 质量比例的硅溶胶配制溶液; 取 10 g 改性后纳米 SiO<sub>2</sub> 添加至上述溶液中, 搅拌 30 min, 并调节其 pH 值为 3, 制得纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化剂。

#### 1.2.2 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青制备

室温下启动胶体磨(JM-L50), 加入沸水循环预热不低于 5 min, 将上述溶液水浴加热至 85 ℃。加热基质沥青至熔流状态(70<sup>#</sup> 基质沥青建议加热至 145 ℃)。称取相同质量的沥青和纳米 SiO<sub>2</sub> 水溶液, 将其缓缓倒入胶体磨中。胶体磨高速剪切, 完成对沥青的乳化, 制得纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青。

## 2 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青高温性能分析

由于纳米 SiO<sub>2</sub> 添加过多会对蒸发残留物的延度产生一定影响, 参考文献[8], 选择 5% 纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量, 在不同缩聚物掺量下制备乳化沥青进行软化点和针入度试验、蒸发残留物试验。以普通 SBR 乳化沥青和基质沥青作为对照。

### 2.1 软化点和针入度试验

对普通 SBR 乳化沥青、不同缩聚物掺量的 5% 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青进行软化点和针入度试验, 试验结果见表 1。

由表 1 可知: 相较于普通改性乳化沥青, 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的软化点有所提高, 说明纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒有助于提高沥青的高温性能; 缩聚物掺量对纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青软化点的影响较小; 与普通改性乳化沥青相比, 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的针入度有所减小,

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778621)

表 1 不同乳化沥青软化点和针入度试验结果

乳化沥青类型	软化点/ ℃	25℃针入度/ (0.1 mm)
普通 SBR 乳化沥青	52	68
5%SiO <sub>2</sub> +5%缩聚物	59	66
5%SiO <sub>2</sub> +10%缩聚物	58	65
5%SiO <sub>2</sub> +15%缩聚物	61	62
5%SiO <sub>2</sub> +20%缩聚物	64	63
5%SiO <sub>2</sub> +25%缩聚物	62	62

说明纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒会使沥青变硬。

## 2.2 差热分析

沥青在温度升高的过程中从固态变为液态,其物理性质发生变化。该过程伴随着热量变化,能反映沥青对温度变化的敏感性,这是差热分析的测试原理。

由于沥青在试验温度变化过程中存在相态变化,温度从低到高分别为玻璃态、黏弹态、黏流态,而参比物没有相态变化,吸收热量的变化表现在蒸发残留物高温热性能曲线上就是曲线峰即吸热峰。吸热峰的大小和位置能反映沥青微观性质的变化,微观性质的变化可以反映沥青热性能的变化。吸热峰大,说明沥青加热后物理性质变化大,沥青的热稳定性差;吸热峰小,沥青的热稳定性好。

分析基质沥青和 5% 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性乳化沥青的蒸发残留物,试验温度为 20~80℃,升温速率为 10℃/min,试验结果见图 1、图 2。从图 1、图 2 可以看出:温度升高至 50℃左右时,两种沥青的蒸发残留物高温热性能曲线出现波动即产生吸热峰,说明在该温度范围内沥青发生相态变化,从黏弹体变为黏流体。特定温度下,沥青不同组分会不同相态变化,不同组分的吸热峰会耦合成吸热峰。稳定的沥青在温度变化过程中受到的影响小,其蒸发残留物高温热性能曲线平坦、光滑,吸热峰很少出现或很小。纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的蒸发残留物高温热性能曲线比基质沥青更平坦,且没有多余的吸热峰产生,说明纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒能均匀地分散在沥青各组分中。与基质沥青相比,5% 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青蒸发残留物的吸热峰面积减小 70% 左右,说明纳米 SiO<sub>2</sub> 的加入改善了沥青组分发生相态转变的数量,吸热量降低,沥青的热稳定性得到提高。

对沥青蒸发残留物高温热性能曲线上信息(包

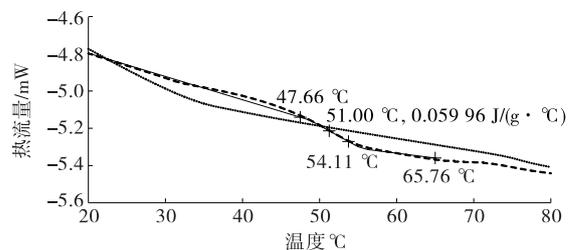
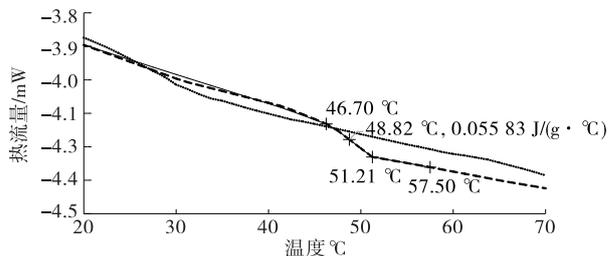


图 1 基质沥青的蒸发残留物高温热性能曲线

图 2 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的蒸发残留物高温热性能曲线

括吸热峰面积、吸热峰温度范围等)进行分析,结果见表 2。从表 2 可以看出:与基质沥青相比,5% 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的比热容、发生相态转变的温度区间、吸热量均减小,主要表现为温度区间右端值减小。吸热峰由多种组分吸热峰叠加而成,各组分的吸热峰有大有小,转变温度有高有低,从蒸发残留物高温热性能曲线来看,50℃左右发生相态转变的组分吸热峰较大,转变温度靠近温度区间两端的组分吸热峰较小,纳米 SiO<sub>2</sub> 的加入降低了吸热峰,转变温度低的组分的吸热峰峰值减小,部分转变温度较高的组分的吸热峰更平坦,因而吸热峰减小的同时温度区间也减小,沥青的感温性和热稳定性得到提高。

表 2 不同沥青蒸发残留物高温热性能分析

沥青类型	质量/ mg	比热容/[J· (g·°C) <sup>-1</sup> ]	高温区 间/°C	吸热量/ (mW·mg <sup>-1</sup> )
基质沥青	7.6	0.059 96	47.66~65.76	1.039
5%纳米 SiO <sub>2</sub> 乳化沥青	6.4	0.055 83	46.70~57.50	0.309

## 2.3 蒸发残留物高温流变性能分析

采用 Superpave 体系中动态剪切流变仪(DSR)测定沥青的复数剪切模量  $G^*$  和相位角  $\delta$ ,分析高温条件下沥青的流变性能。以车辙因子  $G^*/\sin\delta$  表征高温下沥青抵抗永久变形的能力,在最高路面设计温度下,其值越大沥青的抗车辙能力越强。

试验采用 Advanced Rheometer-2000ex 流变

仪, 应变值为 12%, 试验频率为 1.592 Hz。试验温度为 64 °C、70 °C、76 °C、82 °C。采用直径为 25 mm 的平板夹具, 厚度为 1 mm。分别对普通 SBR 乳化沥青和纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的蒸发残留物进行动态剪切流变试验, 结果见表 3。

表 3 不同乳化沥青蒸发残留物的车辙因子

乳化沥青类型	不同温度(°C)下车辙因子/kPa			
	64	70	76	82
普通 SBR 乳化沥青	2.802	1.212	0.865	—
纳米 5%SiO <sub>2</sub> +5%缩聚物	8.482	4.862	1.194	0.942
SiO <sub>2</sub> 5%SiO <sub>2</sub> +10%缩聚物	8.584	4.324	1.163	0.809
乳化 5%SiO <sub>2</sub> +15%缩聚物	8.763	4.082	1.468	0.814

从表 3 可以看出: 5% 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青的蒸发残留物原样满足车辙因子  $G^*/\sin\delta > 1.0$  kPa 的要求, 老化后满足车辙因子  $G^*/\sin\delta > 2.0$  kPa 的要求, 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化沥青达到 76 °C PG 高温等级, 高温性能改善明显。

### 3 结语

根据基质沥青、普通 SBR 乳化沥青、纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化改性沥青软化点、针入度常规高温指标试验及热性能和流变性能分析结果, 纳米 SiO<sub>2</sub> 乳化改性沥青的高温性能提高较大, 能解决普通改性乳化沥青

高温性能不足的问题, 在道路工程领域具有一定推广应用价值, 特别适于用作不黏轮乳化沥青。

### 参考文献:

- [1] 周灿锋, 吴伟峰, 夏娟, 等. SBR 改性乳化沥青的制备方法与性能研究[J]. 石油沥青, 2012, 26(1): 49-52.
- [2] 龙翔, 许志东, 张新, 等. 高黏高弹改性乳化沥青性能评价及超黏磨耗层应用研究[J]. 公路与汽运, 2022(4): 54-57+62.
- [3] 于明明, 朱浩然, 朱富万. 超黏磨耗层拌和型改性乳化沥青指标与材料开发研究[J]. 公路与汽运, 2020(3): 86-89.
- [4] 刘悦, 陈朝霞, 段兰兰, 等. Pickering 乳液研究进展[J]. 粘接, 2014, 35(12): 82-86+95.
- [5] 马秀良, 梁庆. Pickering 乳化沥青稳定性初步分析[J]. 国防交通工程与技术, 2017, 15(2): 50-53+49.
- [6] CHEN Z Q, LI Z G. Preparation and stabilisation mechanism of asphalt-in-water Pickering emulsion stabilised by SiO<sub>2</sub> nanoparticles[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(7): 1679-1691.
- [7] 栾轶博, 李志刚, 刘聪, 等. 纳米二氧化硅乳化沥青的制备与 Pickering 乳化机理分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 150-155.
- [8] 栾轶博, 张庆成. Pickering 乳化沥青的制备参数研究[J]. 山东交通科技, 2018(2): 53-56.

收稿日期: 2022-08-12

- \*\*\*\*\*
- (上接第 60 页)
- [17] QUDDUS M A. Time series count data models: an empirical application to traffic accidents[J]. Accident Analysis & Prevention, 2008, 40(5): 1732-1741.
  - [18] SONG S, YEO H. Method for estimating highway collision rate that considers state of traffic flow[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2318: 52-62.
  - [19] BARUYA A, FINCH D J. Investigation of traffic speeds and accidents on urban roads [C]//Traffic Management and Road Safety, Proceedings of Seminar J Held at the 22nd PTRC European Transport Forum, University of Warwick, England, September 12-16, 1994. VOLUME P381: 219-230.
  - [20] AYATI E, ABBASI E. Investigation on the role of traffic volume in accidents on urban highways [J]. Journal of Safety Research, 2011, 42(3): 209-214.
  - [21] LASSARRE S. The introduction of the variables "traffic volume," "speed" and "belt-wearing" into a predictive model of the severity of accidents[J]. Accident Analysis & Prevention, 1986, 18(2): 129-134.
  - [22] SAVOLAINEN P, GHOSH I. Examination of factors affecting driver injury severity in michigan's single-vehicle-deer crashes[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2078: 17-25.
  - [23] HU W, CICCHINO J B. Lowering the speed limit from 30 mph to 25 mph in Boston: effects on vehicle speeds[J]. Injury Prevention, 2020, 26(2): 99-102.
  - [24] GARBER N J, GADIRAJU R. Factors affecting speed variance and its influence on accidents[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1989, 1213: 64-71.
- 收稿日期: 2023-02-02