

不粘轮乳化沥青的制备及其性能研究

张凌博, 赵 健, 魏云鹏

华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年9月20日; 录用日期: 2026年10月11日; 发布日期: 2026年10月21日

摘 要

当前乳化沥青在高温条件下粘附施工车辆车轮, 易导致乳化沥青粘层油的层间粘结作用失效, 从而使得路面结构的整体性下降, 大大降低路面的使用寿命。本文采用50#基质沥青和多聚磷酸(PPA)改性剂制备不粘轮乳化沥青, 以解决乳化沥青高温条件下的粘轮问题。通过测试乳化沥青蒸发残留物的软化点、储存稳定性等指标, 分析了制备的不粘轮乳化沥青的理化性能。通过粘轮试验来验证不粘轮乳化沥青的粘轮性能, 对比普通乳化沥青, 在60℃高温条件下, 不粘轮乳化沥青具有优异的不粘轮效果。通过对乳化沥青进行不同温度的层间剪切试验来研究其层间粘结性能, 结果显示, 在不同温度条件下, 不粘轮乳化沥青的层间剪切强度均为最优; 且在60℃高温条件下, 不粘轮乳化沥青的层间剪切强度是普通乳化沥青的3.3倍。不粘轮乳化沥青的破乳速度快, 可以大大缩减交通封闭时间, 提高施工效率, 节省工程成本。

关键词

不粘轮乳化沥青, 多聚磷酸, 粘轮性能, 层间粘结性能

Preparation and Performance Study of Non-Stick Wheel Emulsified Asphalt

Lingbo Zhang, Jian Zhao, Yunpeng Wei

School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: September 20, 2026; accepted: October 11, 2026; published: October 21, 2026

Abstract

Currently, emulsified asphalt tends to adhere to the wheels of construction vehicles under high-temperature conditions, which easily leads to the failure of the interlayer bonding function of the emulsified asphalt tack coat, thereby reducing the structural integrity of the pavement and significantly

shortening its service life. In this paper, a non-tracking (anti-wheel-tracking) emulsified asphalt was prepared using 50# base asphalt and polyphosphoric acid (PPA) as a modifier to address the wheel-tracking problem of emulsified asphalt at high temperatures. The physicochemical properties of the prepared non-tracking emulsified asphalt were analyzed by testing indicators such as the softening point and storage stability of its evaporation residue. A wheel-tracking test was conducted to verify the anti-tracking performance of the non-tracking emulsified asphalt. Compared with ordinary emulsified asphalt, the non-tracking emulsified asphalt exhibited excellent anti-tracking performance at a high temperature of 60°C. Interlayer shear tests at different temperatures were performed to investigate the interlayer bonding performance of the emulsified asphalt. The results showed that the interlayer shear strength of the non-tracking emulsified asphalt was optimal at all tested temperatures; specifically, at 60°C, its interlayer shear strength was 3.3 times that of ordinary emulsified asphalt. Moreover, the non-tracking emulsified asphalt features a rapid demulsification rate, which can greatly reduce road closure time, improve construction efficiency, and save engineering costs.

Keywords

Non-Stick Wheel Emulsified Asphalt, Polyphosphoric Acid, Wheel-Sticking Performance, Interlayer Bonding Performance

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

我国沥青混凝土路面结构设计主要依据层状弹性体系理论, 该理论的基本假设各结构层之间完全接触并连续, 且层间不存在摩擦力[1]。但在实际施工中, 沥青混凝土路面各结构层之间分层进行摊铺, 是不连续的, 因此需要选用粘结材料将各结构层粘结起来。如果层间粘结材料选择不当, 沥青路面层间粘结力会变差, 使得路面的结构整体性下降, 进而导致路面在荷载作用下, 易出现层间滑移、拥包、车辙、裂缝等病害, 大大降低路面的使用寿命[2]-[4]。

乳化沥青是实际施工中常用的粘结材料, 常被用于沥青混凝土路面各层间, 随着乳化沥青中的水分蒸发、完成破乳后形成沥青粘层, 可提升路面结构层间的粘结力, 进而增强沥青路面结构的耐久性和承载力。但在实际工程中, 普通乳化沥青温度敏感性大, 高温易软化且具有很强的粘性, 在乳化沥青洒布后并破乳完成后的施工中, 施工车辆在洒布乳化沥青的路面上行驶时, 易出现粘结材料粘附轮胎的现象。这使得路面乳化沥青粘层被破坏, 进而导致路面层间粘结性能下降, 加大了发生层间脱落和滑移的风险。因此, 众多学者开展了关于乳化沥青在高温下不粘轮的相关研究, 得出了一些方法和成果, 但所用的改性剂价格较贵且制备过程较复杂, 导致不粘轮乳化沥青的推广和使用受限[5]-[8]。

乳化沥青发生粘轮的主要原因为: 制备乳化沥青的基质沥青软化点较低, 且夏季施工路面温度较高。高温条件下, 破乳后的乳化沥青易软化变粘, 施工车辆作业时, 软化后的沥青会被粘附带走, 从而降低乳化沥青的层间粘结性能[9]。因此, 本研究采用 50#基质沥青和多聚磷酸(PPA)改性剂来制备不粘轮乳化沥青, 并对其理化性能、粘轮性能及粘结性能进行分析研究。

2. 试验原材料

2.1. 沥青

沥青采用京博 50#基质沥青, 其技术性能指标如表 1 所示。

Table 1. Technical performance indicators of Jingbo 50# asphalt
表 1. 京博 50#沥青技术性能指标

试验指标	试验结果	试验方法
针入度(25℃)/(0.1 mm)	55.5	T 0604
延度(10℃)/cm	24	T 0605
软化点/℃	51.5	T 0606
密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	1.029	T 0603
溶解度(三氯乙烯)/%	99.6	T 0607
动力黏度(60℃)/(Pa·s)	235	T 0620
闪点/℃	336	T 0611
蜡含量/%	1.6	T 0615

2.2. 乳化剂

为了加快施工进度，减少养护时间，需要不粘轮乳化沥青具有较快的破乳速度，因此选择快裂型阳离子乳化剂。该乳化剂是一种白色膏状固体，pH 值在 6~8 之间，易溶于热水。

2.3. 改性剂

改性剂选择多聚磷酸(PPA)，其能与沥青发生接枝、酯化等反应，显著提升沥青的高温稳定性和抗车辙能力，因此可以显著提升乳化沥青蒸发残留物的软化点。

2.4. 助剂

乳化效果越好，制备的乳化沥青越均匀、细腻，且优异的储存稳定性是保证乳化沥青长期稳定的关键。因此，常采用助剂来提高乳化效果和储存稳定性，常见的助剂为稳定剂和 pH 调节剂。

(1) 稳定剂。稳定剂采用无水 CaCl₂，可以保持沥青颗粒的分散状态，防止沥青颗粒在乳液中聚集或沉淀，有利于提高乳液的长期稳定性和防止沥青分离。

(2) pH 调节剂。pH 调节剂采用盐酸，可以维持适当的酸性环境，促进乳化剂的解离，有利于提高乳化效果，增强乳化沥青的稳定性。

3. 试验方法

3.1. 不粘轮乳化沥青的制备方法

(1) 首先取适量的 50#基质沥青并置于 150℃的烘箱中加热，使其具有流动性；接着加入沥青质量 1% 的多聚磷酸(PPA)，并搅拌均匀，使沥青与多聚磷酸(PPA)充分融合；然后将制备好的改性沥青置于 150℃烘箱中保温备用。

(2) 将规定剂量的乳化剂、稳定剂倒入盛有 50℃~60℃温热水的大烧杯中搅拌制备皂液，乳化剂和稳定剂完全溶解后，接着用盐酸调节皂液 pH 值为 2~3，然后将皂液放置在一旁的水浴中保温备用。

(3) 将胶体磨打开并预热 3~5 min，预热结束后先用清水在胶体磨中循环 1 min 左右后倒掉，将胶体磨中的杂质等清理干净，防止制备乳化沥青的过程中出现堵塞情况，接着倒入皂液并循环剪切 2~3 min；然后将改性沥青缓慢倒入胶体磨中，使胶体磨剪切得更均匀、细腻；改性沥青完全倒入后，使其在胶体磨中循环剪切 2~3 min，使其充分乳化；最后将制备好的不粘轮乳化沥青倒入烧杯中保存备用。

3.2. 粘轮试验测试方法

为了尽可能真实地模拟施工车辆车轮碾压路面粘层的过程, 检验不粘轮乳化沥青的粘轮性能, 本文采用车辙仪进行室内模拟实验, 模拟碾压过程如图 1 所示, 具体试验步骤如下:

(1) 首先按规范成型车辙板, 接着将制备的不粘轮乳化沥青和普通乳化沥青以 0.4 kg/m^2 的洒布量, 用洁净的毛刷分别将乳化沥青均匀地涂抹在车辙板上; 室温条件下静止 24 h, 使其完全破乳。

(2) 将彩色橡胶条裁成 $300 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的尺寸, 称重并记录其原始质量 M ; 将裁好的橡胶条和涂有乳化沥青的车辙板一同置于 60°C 车辙仪试验室中保温 4 h。保温结束后, 将橡胶条迅速放置在车辙仪滚轮正下方的车辙板上进行车辙试验, 设置车辙仪的碾压次数为 20 次; 碾压完成后, 迅速将橡胶条从车辙板表面撕下, 称重并记录橡胶条碾压后的质量。

(3) 根据橡胶条碾压前后的质量变化($M_1 - M$), 计算乳化沥青的粘附率(α), 从而定量分析不粘轮乳化沥青的粘附情况, 粘附率计算公式如式(1) [10]:

$$\alpha = \frac{M_1 - M}{a \times S} \quad (1)$$

式中, α : 粘附率(%); M_1 : 橡胶条碾压后的质量(g); M : 橡胶条碾压前的质量(g); a : 乳化沥青洒布量(g/m^2); S : 橡胶条面积(m^2)。



Figure 1. Simulated rolling in wheel-sticking test
图 1. 粘轮试验模拟碾压

3.3. 层间剪切试验测试方法

本研究采用三轴试验仪进行层间剪切试验, 剪切过程如图 2 所示, 通过层间剪切强度来评价不粘轮乳化沥青在层间的粘结强度, 具体试验步骤如下:

(1) 用洁净的毛刷将不粘轮乳化沥青和普通乳化沥青以 0.4 kg/m^2 的洒布量分别均匀涂抹在成型的车辙板表面, 待乳化沥青完全破乳; 然后将同样大小的车辙板置于涂有乳化沥青的上面并碾压成型, 碾压完成后在室温下放置 48 h; 最后脱模, 并用钻芯机在成型好的试件上钻取芯样。

(2) 将钻取的芯样置于设置好规定温度的恒温恒湿箱中保温至少 4 h; 保温结束后, 将保温好的芯样放置在三轴试验仪中并用夹具固定, 然后开启三轴试验仪进行层间剪切试验, 剪切速率为 20 mm/min 。

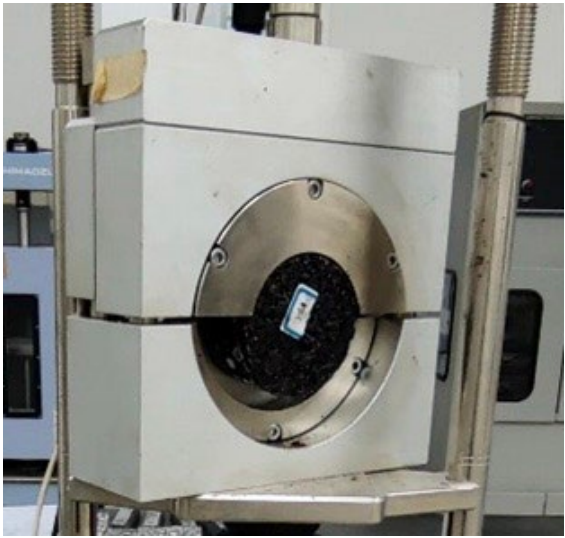


Figure 2. Interlayer shear test
图 2. 层间剪切试验

4. 试验结果分析

4.1. 理化性能

对比制备的不粘轮乳化沥青和普通乳化沥青的相关理化指标，其相关理化指标结果如表 2 所示。

Table 2. Comparison of physicochemical properties of different emulsified asphalts
表 2. 不同乳化沥青理化指标对比

理化指标		不粘轮乳化沥青	普通乳化沥青	技术要求	试验方法
蒸发残留物含量/%		52.5	50.2	≥50	T 0651
破乳速度		快裂	慢裂	-	T 0658
筛上剩余量(1.18 mm)/%		0.01	0.06	≤0.1	T 0652
恩格拉黏度		12.6	8.03	8~28	T 0622
与粗集料的黏附性		>2/3	>2/3	>2/3	T 0654
软化点/℃		66.5	47.5	≥43	T 0606
蒸发残留物稳定性	针入度(25℃)/mm	21.6	29.8	5~30	T 0604
	延度(25℃)/cm	>100	>100	≥40	T 0605
储存稳定性	1 d/%	0.1	0.3	≤1	T 0656
	5 d/%	1.2	2.5	≤5	T 0656

由上表 2 可知，不粘轮乳化沥青蒸发残留物软化点高达 66.5℃，而普通乳化沥青的软化点仅为 47.5℃，这表明自制的不粘轮乳化沥青具有优异的高温性能，在夏季高温施工过程中，可以有效保证乳化沥青不被施工车辆黏结带走，从而达到不粘轮的效果。自制的不粘轮乳化沥青 1 d 储存稳定性为 0.1%，而 5 d 储存稳定性仅为 1.2%，均显著优于普通乳化沥青，表明不粘轮乳化沥青具有良好的长期储存稳定性，为接下来不粘轮乳化沥青的长距离运输以及长时间储存提供了有利条件。同时，自制的不粘轮乳化沥青的破乳速度快，可以大大缩减交通封闭时间，提高施工效率，节省工程成本。

4.2. 粘轮性能

根据上述 3.2 粘轮试验方法测试乳化沥青的粘轮性能，结果如表 3 所示。

Table 3. Adhesion rates of different emulsified asphalts
表 3. 不同乳化沥青的粘附率

试验温度	乳化沥青	碾压前质量/g	碾压后质量/g	粘附沥青质量/g	粘附率/%
60℃	不粘轮乳化沥青	35.39	36.00	0.61	8.5
	普通乳化沥青	35.28	37.84	2.56	35.6

由上表 3 可知，在 60℃ 的高温条件下，不粘轮乳化沥青的粘附率仅为 8.5%，而普通乳化沥青的粘附率为 35.6%，不粘轮乳化沥青的粘附率比普通乳化沥青降低了 76%，不粘轮效果显著。添加适量的多聚磷酸(PPA)，使得不粘轮乳化沥青蒸发残留物软化点得以提高，从而有效提升乳化沥青的高温性能，保证高温条件下不粘轮乳化沥青的粘附率较小，大大降低了施工车辆碾压对乳化沥青粘结层的影响，使得乳化沥青粘结层的粘结作用得以充分发挥。

4.3. 层间粘结性能

根据上述 3.3 层间剪切试验方法进行乳化沥青层间剪切强度的测试，具体结果如表 4 所示。

Table 4. Interlayer shear strength of emulsified asphalt at different temperatures
表 4. 不同温度下乳化沥青的层间剪切强度

温度/℃	不粘轮乳化沥青层间剪切强度/kPa	普通乳化沥青层间剪切强度/kPa
25	926	718
40	692	389
60	325	98

由上表 4 可知，在三种温度条件下，不粘轮乳化沥青的层间剪切强度均高于普通乳化沥青。随着温度的升高，两种乳化沥青的层间剪切强度均逐渐下降，且普通乳化沥青的层间剪切强度下降幅度最大，表明其作为粘结层时粘结强度随温度变化影响较大，温度越高，粘结强度越低，在荷载作用下越易发生脱落、滑移。在 60℃ 高温条件下，不粘轮乳化沥青的层间剪切强度为 325 kPa，是普通乳化沥青层间剪切强度的 3.3 倍，这是由于在乳化改性过程中多聚磷酸(PPA)的加入增强了乳化沥青的粘结力，从而使得不粘轮乳化沥青在高温条件下具有良好的粘结强度，其作为粘结层在高温下可以正常发挥粘结作用。

5. 结论

- (1) 本文采用 50#基质沥青和多聚磷酸(PPA)改性剂制备了不粘轮乳化沥青。多聚磷酸(PPA)作为改性剂可以显著提升乳化沥青的软化点，使乳化沥青在高温条件下具有良好的高温性能和不粘轮效果。
- (2) 制备的不粘轮乳化沥青具有良好的理化性能，且不粘轮乳化沥青的储存稳定性显著优于普通乳化沥青，可以有效满足不粘轮乳化沥青的运输及储存需求。同时，制备的不粘轮乳化沥青的破乳速度快，可以大大缩减交通封闭时间，提高施工效率，节省工程成本。
- (3) 在 60℃ 高温条件下，不粘轮乳化沥青的粘附率仅为 8.5%，比普通乳化沥青的粘附率大约降低了 76%，不粘轮效果显著，可以有效解决乳化沥青在夏季高温施工中的粘轮问题，具有良好的工程实践价值。

(4) 在不同温度条件下, 不粘轮乳化沥青的层间剪切强度均高于普通乳化沥青。在 60℃ 高温条件下, 不粘轮乳化沥青的层间剪切强度为 325 kPa, 是普通乳化沥青层间剪切强度的 3.3 倍, 表明不粘轮乳化沥青在高温条件下具有良好的粘结强度, 其作为粘结层在高温下可以正常发挥粘结作用。

参考文献

- [1] 王佳, 蒲昌瑜, 吴迪. 不粘轮乳化沥青的制备及其性能评价[J]. 公路交通科技, 2022, 39(10): 9-16.
- [2] 姜军. 不黏轮乳化沥青制备及性能研究[J]. 公路交通技术, 2025, 41(5): 32-39+56.
- [3] 张政基, 李东钊, 李攀, 程亚峰, 宋传杰. 不黏轮乳化沥青的性能研究[J]. 山东化工, 2024, 53(22): 76-78+83.
- [4] 杨闯, 张敬义, 黄婉利. 乳化硬质沥青的制备及其在粘层油中的性能评价[J]. 石油沥青, 2017, 31(1): 64-67.
- [5] 熊敏. 沥青面层层间黏结材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [6] 何锐, 武书华, 管勤, 曹进, 陈华鑫. 沥青路面层间粘结性能影响因素试验研究[J]. 中外公路, 2015, 35(4): 272-276.
- [7] Hou, D., Han, M., Muhammad, Y., Liu, Y., Zhang, F., Yin, Y., *et al.* (2018) Performance Evaluation of Modified Asphalt Based Trackless Tack Coat Materials. *Construction and Building Materials*, **165**, 385-394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.187>
- [8] Hu, X., Lei, Y., Wang, H., Jiang, P., Yang, X. and You, Z. (2017) Effect of Tack Coat Dosage and Temperature on the Interface Shear Properties of Asphalt Layers Bonded with Emulsified Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*, **141**, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.157>
- [9] 田伟, 高玉梅, 赵雅芳, 杜森, 朱从伟, 郑文军. 不粘轮乳化沥青国内研究进展[J]. 市政技术, 2024, 42(5): 47-53+122.
- [10] 王鹏, 王杰, 赵彩琴, 等. 不粘轮乳化沥青黏层不粘轮效果试验方法研究进展[J]. 石油沥青, 2023, 37(6): 50-56.