

温拌剂类型 - 含水率 - 老化程度对温拌沥青的影响研究

史经春

湖南大学设计研究院有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年2月10日; 录用日期: 2026年3月3日; 发布日期: 2026年3月12日

摘要

为揭示温拌剂类型、含水率及老化程度三者耦合作用对温拌沥青性能的影响规律, 明确多因素交互作用机制, 本研究选取3种典型温拌剂(有机降粘型、泡沫型、化学改性型), 设置5个含水率梯度(0%, 1%, 2%, 3%, 4%)及3个老化阶段(未老化、短期老化、长期老化), 构建三因素全因子试验矩阵。通过物理性能、流变性能及水稳定性测试, 系统分析三者单独及耦合作用对温拌沥青性能的影响。采用多因素方差分析量化各因素及交互作用的显著性, 并建立多元线性回归预测模型。结果表明: 温拌剂类型、含水率及老化程度均对温拌沥青性能产生显著影响, 其中主效应及两两交互作用达到极显著水平($p < 0.01$), 三因素交互作用达到显著水平($p < 0.05$); 泡沫型温拌剂抗水损害及抗老化能力最优; 含水率每增加1%, 未老化、短期老化及长期老化状态下温拌沥青延度分别平均下降5.2%、8.7%和12.3%, 且老化程度加剧水分对沥青性能的劣化效应。建立的预测模型经残差分析及外部数据验证, 相对误差小于5%, 具有较高预测精度。研究结果为复杂环境条件下温拌剂科学选型及耐久性设计提供了定量依据。

关键词

温拌沥青, 温拌剂类型, 含水率, 老化程度, 耦合影响, 性能劣化

Research on the Effects of Warm-Mix Agent Type-Moisture Content-Aging Degree on Warm-Mix Asphalt

Jingchun Shi

Hunan University Design and Research Institute Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: February 10, 2026; accepted: March 3, 2026; published: March 12, 2026

Abstract

To reveal the influence laws of the coupling effect of three factors—the type of warm-mix agent, the moisture content, and the aging degree—on the performance of warm-mixed asphalt, and to clarify the mechanism of multi-factor interaction, this study selected three typical warm-mix agents (organic viscosity-reducing type, foam type, and chemical modification type), set up 5 moisture content gradients (0%, 1%, 2%, 3%, 4%) and 3 aging stages (un-aged, short-term aging, and long-term aging), and constructed a three-factor full-factor experimental matrix. Through physical properties, rheological properties, and water stability tests, the influence of the three factors alone and their coupling effect on the performance of warm-mixed asphalt were systematically analyzed. Multifactor variance analysis was used to quantify the significance of each factor and the interaction effect, and a multiple linear regression prediction model was established. The results show that the type of warm-mix agent, moisture content, and aging degree all have significant effects on the performance of warm-mixed asphalt. Among them, the main effect and pairwise interaction reach an extremely significant level ($p < 0.01$), and the three-factor interaction reaches a significant level ($p < 0.05$). The foam-type warm-mix agent has the best resistance to water damage and aging. For each 1% increase in moisture content, the elongation of warm-mixed asphalt in un-aged, short-term aging, and long-term aging states decreases by an average of 5.2%, 8.7%, and 12.3%, respectively. Moreover, the aging degree intensifies the deterioration effect of water on the performance of asphalt. The established prediction model was verified by residual analysis and external data, with a relative error of less than 5%, and has high prediction accuracy. The research results provide a quantitative basis for the scientific selection of warm-mix agents and durability design under complex environmental conditions.

Keywords

Warm-Mixed Asphalt, Warm-Mix Agent Type, Moisture Content, Degree of Aging, Coupling Influence, Performance Deterioration

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

在全球“双碳”目标引领下，温拌沥青技术凭借低温施工、节能减排、降尘降噪等显著优势，已成为道路工程绿色化发展的核心技术之一。相较于传统热拌沥青，温拌沥青通过添加温拌剂降低拌和与摊铺温度，可减少 30%~50%的能源消耗，降低 15%~30%的有害气体排放，在高速公路、市政道路等工程中应用日益广泛[1]-[3]。然而，温拌沥青路面在长期服役过程中，需同时承受自然环境(水分侵蚀、温度变化)与使用荷载的双重作用，且温拌剂的引入改变了沥青的化学组成与微观结构，使得其性能演化规律更为复杂。

现有研究已证实[4]-[10]，水分侵入是导致沥青路面出现剥落、坑槽、松散等水损害病害的核心诱因，含水率的增加会显著降低沥青的粘稠度、界面粘附性及混合料水稳定性。同时，沥青老化(短期热老化、长期光氧老化)会导致分子链交联、脆性增强，进一步加剧路面性能劣化。此外，不同类型温拌剂的作用机理差异显著：有机降粘型温拌剂通过降低沥青粘度实现低温施工，泡沫型温拌剂通过水发泡增大沥青表面积改善裹覆效果，化学改性型温拌剂则通过化学反应改变沥青分子结构。已有研究多聚焦于单一因

素(如含水率或老化程度)对温拌沥青性能的影响,或两两因素的交互作用,如“温拌剂类型-含水率”“温拌剂类型-老化程度”的二元耦合研究,但对于三者协同作用下的性能演化规律、交互作用强度及劣化机制尚未系统揭示。

实际工程中,温拌沥青路面往往同时面临温拌剂类型差异、不同程度水分侵蚀及长期老化作用,三者的耦合效应可能导致路面性能出现非线性劣化,单一因素或二元耦合研究成果难以精准指导工程实践。例如,在潮湿多雨且温差较大的地区,温拌沥青路面需同时承受高含水率与强老化作用,不同类型温拌剂的适配性差异显著,若仅依据单一因素研究结果选型,可能导致路面早期损坏。因此,开展“温拌剂类型-含水率-老化程度”三维耦合影响研究,量化各因素及交互作用对温拌沥青性能的影响权重,揭示耦合劣化机制,具有重要的学术价值与工程意义。

本研究基于现有研究空白,选取3种典型温拌剂,设置多梯度含水率与老化阶段,构建三维试验矩阵,通过系统的室内试验与理论分析,明确三者耦合作用对温拌沥青物理性能、流变性能及水稳定性的影响规律,建立性能预测模型,为温拌沥青技术在复杂环境下的科学应用提供理论支撑与技术方案。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

2.1.1. 基质沥青

选用70#道路石油沥青作为基质沥青,其基本性能指标符合《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)要求,具体指标见表1。

Table 1. Main parameters of matrix asphalt

表 1. 基质沥青主要参数指标

测试指标	技术要求	实测值	试验方法
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1mm	60~80	72	T0604-2011
软化点(环球法)/℃	≥46	48.5	T0606-2011
延度(15℃, 5 cm/min)/cm	≥100	108	T0605-2011
运动粘度(135℃)/Pa·s	≤3.0	2.6	T0625-2011
质量损失(RTFOT, 163℃, 85 min)/%	≤±0.8	0.4	T0610-2011
残留针入度比(RTFOT 后)/%	≥61	68	T0604-2011

2.1.2. 温拌剂

选取市场应用广泛的3种典型温拌剂,分别标记为WMA-1(有机降粘型,主要成分为脂肪酸酰胺)、WMA-2(泡沫型,主要成分为表面活性剂)、WMA-3(化学改性型,主要成分为聚烯烃类聚合物),其基本参数见表2。根据厂家推荐及前期预试验,确定3种温拌剂的最佳掺量均为3%(占沥青质量分数)。

Table 2. Basic parameters of warm mixing agent

表 2. 温拌剂基本参数

温拌剂类型	型号	作用机理	外观
有机降粘型	WMA-1	降低沥青分子间作用力,减小粘度	淡黄色液体
泡沫型	WMA-2	与水作用产生泡沫,增大沥青表面积	白色粉末
化学改性型	WMA-3	与沥青分子交联,改善流变性能	棕褐色颗粒

2.1.3. 集料与填料

采用石灰岩集料，级配类型为 AC-13，符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004)要求，集料级配曲线见图 1。填料选用石灰岩磨细矿粉，其表观相对密度为 2.75 g/cm^3 ，含水量为 0.3%，塑性指数为 4，符合规范要求。

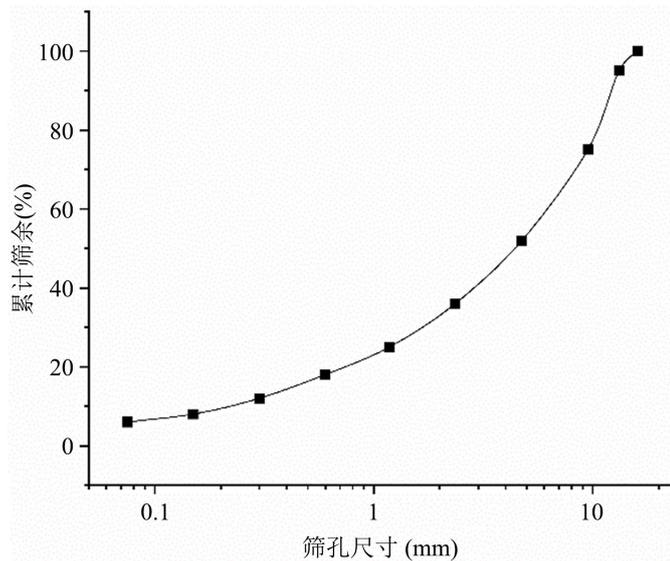


Figure 1. Aggregate gradation curve
图 1. 集料级配曲线

2.1.4. 试验用水

采用蒸馏水，符合《实验室用水规格》(GB/T 6682-2008)中三级水要求，电导率 $\leq 0.5 \text{ mS/m}$ ，pH 值为 6.5~7.5，用于含水率控制及相关试验。

2.2. 实验方案设计

本研究采用全因子试验设计($3 \times 5 \times 3$)，构建“温拌剂类型(3 水平：WMA-1、WMA-2、WMA-3)-含水率(5 水平：0%、1%、2%、3%、4%)-老化程度(3 水平：未老化、短期老化、长期老化)”三维试验矩阵，共 45 组试验，每组试验重复 3 次，取平均值以确保数据可靠性。

2.2.1. 老化处理

短期老化采用旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)，按照 T0610-2011 方法，将沥青样品置于 163°C 烘箱中，旋转 85 min，模拟施工过程中的热老化；长期老化采用压力老化容器试验(PAV)，在 RTFOT 老化基础上，按照 T0631-2011 方法，在 100°C 、2.1 MPa 条件下老化 20 h，模拟路面长期服役过程中的光氧老化。未老化样品直接采用加热熔融后的温拌沥青。

2.2.2. 含水率控制

采用喷雾法控制集料含水率，具体步骤如下：1) 将集料放入 105°C 烘箱中烘干至恒重，冷却至室温后，用电子天平(精度 0.1 g)称取 500 g 集料置于搪瓷盘中；2) 根据目标含水率计算所需加水量，用移液管准确量取蒸馏水，通过喷雾器均匀喷洒在集料表面；3) 喷洒过程中不断翻拌集料，确保水分均匀分布；4) 密封搪瓷盘，置于 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温恒湿箱中静置 24 h，使水分充分渗透；5) 静置后再次称重，计算实际含水率，若与目标含水率偏差超过 $\pm 0.2\%$ ，则重新调整。

2.3. 测试方法

2.3.1. 物理性能测试

按照 JTG E20-2011 规范, 分别测试不同试验工况下温拌沥青的针入度(25℃, 100 g, 5 s)、软化点(环球法)、延度(15℃, 5 cm/min), 评价其基本物理性能。

2.3.2. 流变性能测试

采用动态剪切流变仪(DSR)测试温拌沥青的复数模量(G^*)、相位角(δ), 计算车辙因子($G^*/\sin\delta$), 评价其高温抗车辙性能; 采用弯曲梁流变仪(BBR)测试低温(-10℃, -16℃)下的劲度模量(S)和蠕变速率(m 值), 评价其低温抗裂性能。DSR 测试温度为 52℃、58℃、64℃、70℃, 频率为 10 rad/s; BBR 测试时间为 60 s、120 s、360 s、600 s。

2.3.3. 水稳定性测试

1) 水煮法: 按照 T0616-2011 方法, 将裹覆沥青的集料试件放入沸水中煮 3 min, 观察沥青膜剥落情况, 按五级分类法评价粘附等级(5 级为完全不剥落, 1 级为剥落面积 > 50%)。

2) 冻融劈裂试验: 按照 T0729-2011 方法, 制备马歇尔试件(双面击实 75 次), 分为两组, 一组直接测试劈裂强度(R_0), 另一组经冻融循环(-18℃冷冻 16 h, 60℃浸泡 2 h)后测试劈裂强度(R^T), 计算冻融劈裂强度比($TSR = R^T/R_0 \times 100\%$), 评价混合料水稳定性, $TSR \geq 80\%$ 为合格。

2.3.4. 数据统计分析

为定量评价各因素及其交互作用对性能指标的影响程度, 采用多因素方差分析(ANOVA)方法。显著性通过 F 检验判定($\alpha = 0.05$), 同时采用平方和贡献率衡量各因素影响权重, 其计算方式为:

$$P_i = \frac{SS_i}{SS_{total}} \times 100\%$$

其中, SS_i 为因素 i 的平方和, SS_{total} 为总平方和。贡献率越大, 表明该因素对性能指标影响越显著。

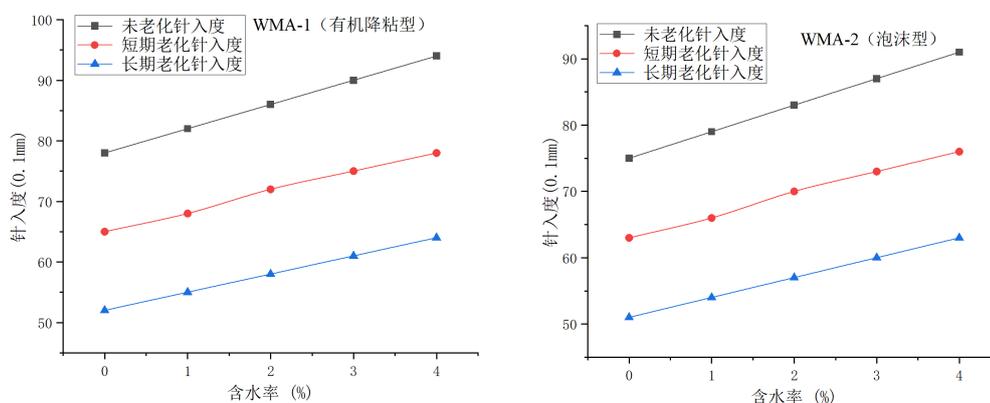
绘制性能变化曲线, 建立多因素耦合性能预测模型。

3. 结果及分析

3.1. 温拌剂类型 - 含水率 - 老化程度对物理性能的耦合影响

3.1.1. 针入度

不同试验工况下温拌沥青针入度测试结果见图 2。由图 2 可知, 针入度随含水率增加呈显著增大趋势, 随老化程度加深呈显著减小趋势, 且不同温拌剂类型对针入度的影响存在差异。



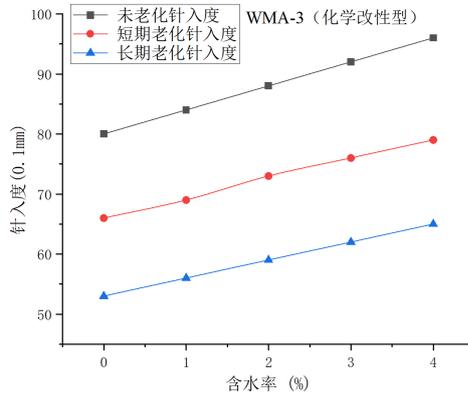


Figure 2. Test results of penetration value of warm-mix asphalt under different test conditions
图 2. 不同试验工况下温拌沥青针入度测试结果

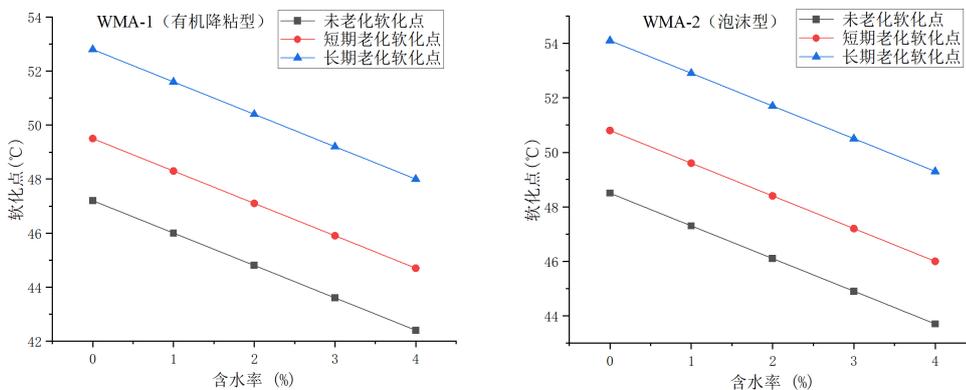
具体分析如下:

1) 单一因素影响: 含水率从 0% 增加到 4%, 未老化、短期老化、长期老化状态下, 3 种温拌沥青针入度平均增幅分别为 18.7%、16.9%、15.4%, 表明水分侵入稀释沥青胶结物质, 降低粘稠度, 且老化程度加深抑制了水分对针入度的增大效应; 老化程度从无到长期老化, 0%、2%、4% 含水率下, 针入度平均降幅分别为 33.3%、32.6%、31.9%, 表明老化导致沥青分子交联, 脆性增强, 且含水率增加缓解了老化对针入度的降低效应; 相同含水率和老化状态下, 针入度大小排序为 WMA-3 > WMA-1 > WMA-2, 表明化学改性型温拌剂使沥青更易软化, 泡沫型温拌剂则使沥青粘稠度更高。

2) 耦合作用影响: 方差分析结果显示, 温拌剂类型(A)、含水率(B)、老化程度(C)及两两交互作用(A × B, A × C, B × C)对针入度的影响均达到极显著水平(p < 0.01), 三因素交互作用(A × B × C)亦达到显著水平(p < 0.05), 表明三因素之间存在一定的耦合作用, 但其影响程度相对较弱。例如, 在长期老化 + 4% 含水率耦合工况下, WMA-3 的针入度为 65 (0.1 mm), 较未老化 + 0% 含水率工况下降 15 (0.1 mm), 降幅 18.8%; 而 WMA-2 的针入度为 63 (0.1 mm), 降幅 16.0%, 表明泡沫型温拌剂在高含水率 + 长期老化耦合工况下针入度衰减更小, 抗耦合劣化能力更强。

3.1.2. 软化点

不同试验工况下温拌沥青软化点的测试结果如图 3 所示。由图 3 可知, 温拌沥青软化点随集料含水率的升高呈显著递减趋势, 随老化程度的加剧呈显著递增趋势, 且温拌剂类型对软化点的影响存在显著性差异。



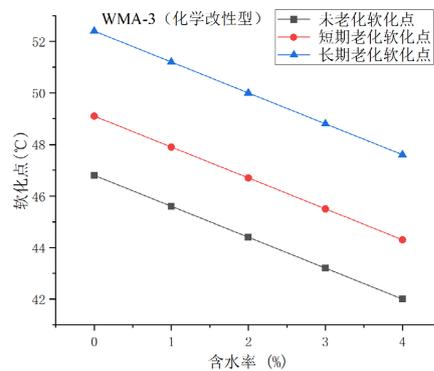


Figure 3. Test results of the softening point of warm-mix asphalt under different test conditions
图 3. 不同试验工况下温拌沥青软化点的测试结果

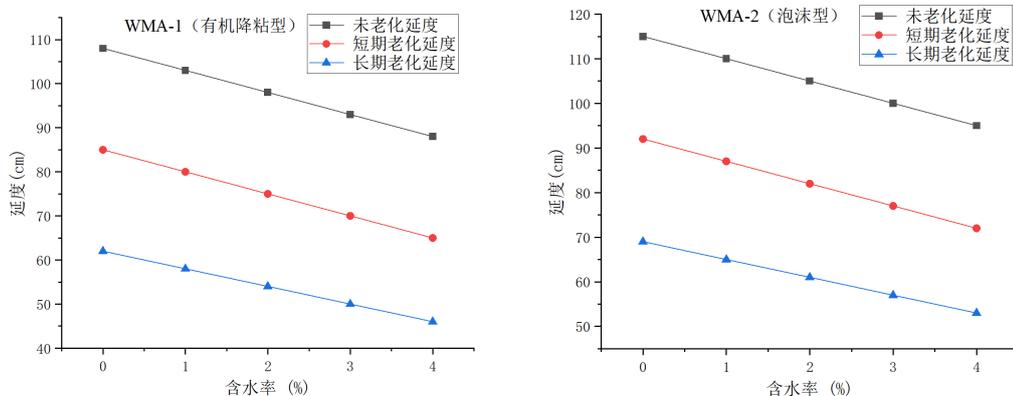
具体分析如下:

1) 单一因素影响规律: 当集料含水率由 0% 提升至 4% 时, 在未老化、短期老化及长期老化状态下, 三种温拌沥青的软化点平均降幅分别为 10.1%、9.7%、9.3%。这一现象表明, 水分会渗透至沥青分子间隙, 破坏分子间作用力, 导致沥青的软化温度降低; 当老化程度从无老化发展至长期老化时, 在含水率为 0%、2%、4% 的工况下, 软化点平均增幅分别为 11.9%、11.6%、11.3%, 说明老化过程会促使沥青分子链发生交联反应, 增强沥青材料的刚性, 进而使软化温度升高; 在相同含水率与老化状态下, 软化点呈现 WMA-2 > WMA-1 > WMA-3 的排序特征, 提示泡沫型温拌剂可提升沥青的高温稳定性, 而化学改性型温拌剂则会降低沥青的软化点。

2) 耦合作用影响规律: 方差分析结果表明, 温拌剂类型、含水率、老化程度及两两交互作用对软化点的影响均达到极显著水平 ($p < 0.01$), 三因素交互作用亦达到显著水平 ($p < 0.05$), 但其贡献率相对较低。其影响权重排序为: 老化程度(C) > 含水率(B) > 温拌剂类型(A) > 含水率 - 老化程度交互作用(B × C) > 温拌剂类型 - 老化程度交互作用(A × C) > 温拌剂类型 - 含水率交互作用(A × B) > 三者耦合作用(A × B × C)。在长期老化与 4% 含水率的耦合工况下, WMA-3 的软化点为 47.6°C, 相较于未老化与 0% 含水率工况下降 2.8°C, 降幅为 6.0%; 而 WMA-2 的软化点为 49.3°C, 降幅仅为 2.5%。上述结果证实, 泡沫型温拌剂在高含水率与长期老化的耦合工况下, 仍能保持更优异的高温稳定性。

3.1.3. 延度

不同试验工况下温拌沥青延度测试结果见图 4。由图 4 可知, 延度随含水率增加呈显著减小趋势, 随老化程度加深呈显著减小趋势, 温拌剂类型对延度的影响差异显著。



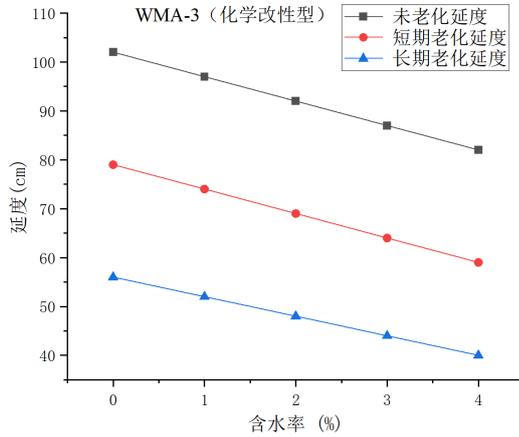


Figure 4. Test results of the elongation of warm-mix asphalt under different test conditions
图 4. 不同试验工况下温拌沥青延度测试结果

具体分析如下:

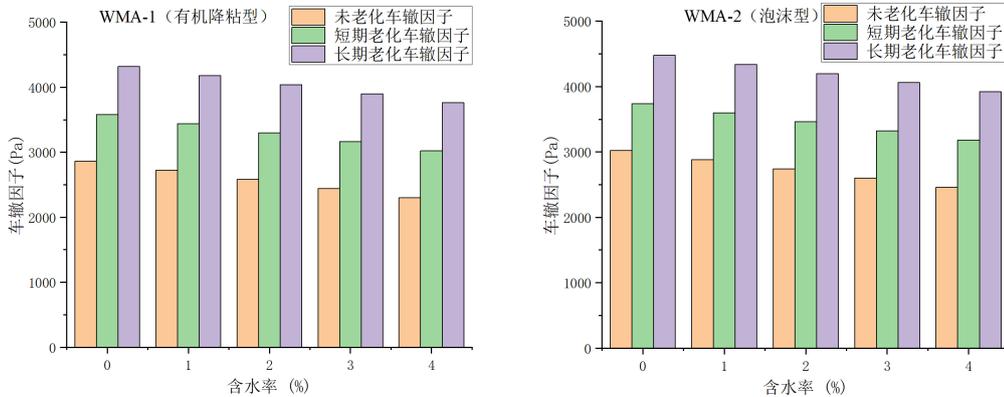
1) 单一因素影响: 含水率从 0%增加到 4%, 未老化、短期老化、长期老化状态下, 3 种温拌沥青延度平均降幅分别为 18.5%、18.9%、19.4%, 表明水分加速了沥青老化, 降低柔韧性和延展性, 且老化程度加深加剧了水分的劣化效应; 老化程度从无到长期老化, 0%、2%、4%含水率下, 延度平均降幅分别为 42.6%、43.3%、44.0%, 表明老化使沥青分子链断裂或交联, 脆性增强, 抗裂性能显著下降; 相同含水率和老化状态下, 延度大小排序为 WMA-2 > WMA-1 > WMA-3, 表明泡沫型温拌剂可提高沥青的低温抗裂性能, 化学改性型温拌剂则降低了沥青的延展性。

2) 耦合作用影响: 方差分析结果显示, 温拌剂类型、含水率、老化程度及两两交互作用对延度的影响均达到极显著水平($p < 0.01$), 三因素交互作用达到显著水平($p < 0.05$)。影响权重排序为 $C > B > A > B \times C > A \times C > A \times B > A \times B \times C$ 。在长期老化 + 4%含水率耦合工况下, WMA-3 的延度为 40 cm, 较未老化 + 0%含水率工况下降 62 cm, 降幅 60.8%; 而 WMA-2 的延度为 53 cm, 降幅仅 53.9%, 表明泡沫型温拌剂在高含水率 + 长期老化耦合工况下低温抗裂性能更优。

3.2. 温拌剂类型 - 含水率 - 老化程度对流变性能的耦合影响

3.2.1. 高温流变性能(DSR 测试)

以 64°C 为例(见图 5), 车辙因子($G^*/\sin\delta$)越大, 沥青高温抗车辙性能越好; 其随含水率增加显著减小、随老化程度加深显著增大, 且受温拌剂类型影响差异明显。



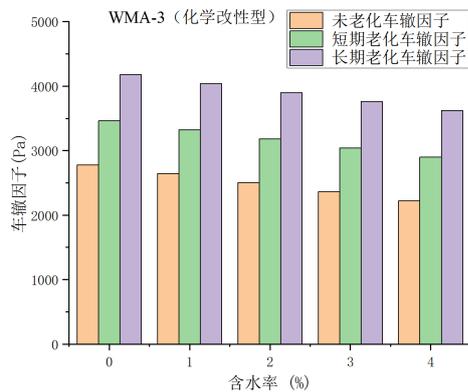


Figure 5. Test results of warm-mix asphalt rutting factors under different test conditions
图 5. 不同试验工况下温拌沥青车辙因子测试结果

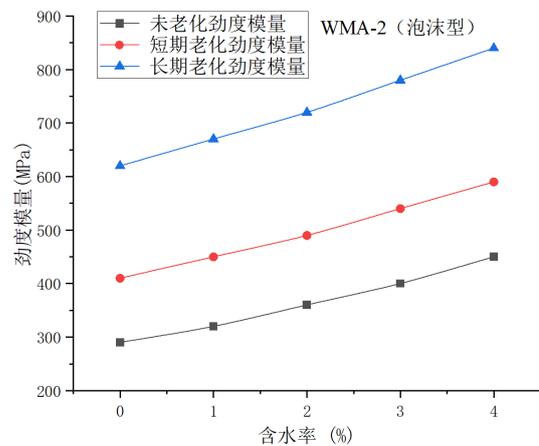
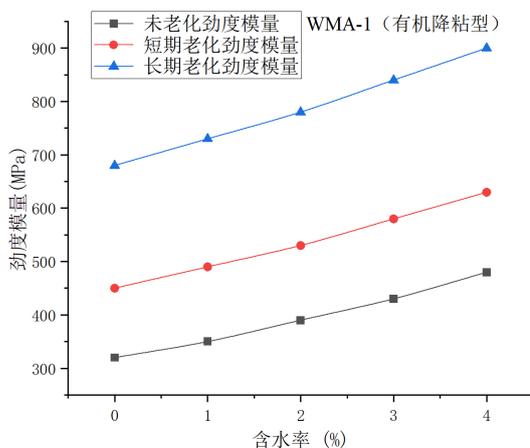
具体分析如下:

1) 单一因素影响规律: 当集料含水率由 0% 提升至 4% 时, 在未老化、短期老化及长期老化状态下, 三种温拌沥青的车辙因子($G^*/\sin\delta$)平均降幅分别为 19.6%、18.4%、17.6%。这一现象表明, 水分的侵入会降低沥青胶结料的弹性模量, 进而削弱其高温抗变形能力; 当老化程度从无老化演进至长期老化时, 在含水率为 0%、2%、4% 的工况下, 车辙因子平均增幅分别为 51.0%、48.8%、46.7%, 说明老化过程可增强沥青的弹性特性, 提升其高温稳定性; 在相同含水率与老化状态下, 车辙因子呈现 WMA-2 > WMA-1 > WMA-3 的排序特征, 证实泡沫型温拌剂对沥青高温抗车辙性能具有显著的提升效应。

2) 耦合作用影响规律: 在长期老化与 4% 含水率的耦合工况下, WMA-3 的车辙因子为 3620 Pa, 相较于未老化与 0% 含水率工况增加 840 Pa, 增幅为 30.2%; WMA-2 的车辙因子为 3920 Pa, 增幅为 30.0%。尽管二者增幅相近, 但 WMA-2 的车辙因子绝对值显著更高, 表明泡沫型温拌剂在高含水率与长期老化的耦合工况下, 仍具备更优异的高温抗车辙性能。

3.2.2. 低温流变性能(BBR 测试)

以 -16°C 为例, 不同试验工况下温拌沥青劲度模量(S)和蠕变速率(m 值)测试结果见图 6 和图 7。劲度模量越小、m 值越大, 表明沥青低温抗裂性能越好。由图可知, 劲度模量随含水率增加呈显著增大趋势, 随老化程度加深呈显著增大趋势; m 值随含水率增加呈显著减小趋势, 随老化程度加深呈显著减小趋势, 温拌剂类型对低温流变参数影响差异显著。



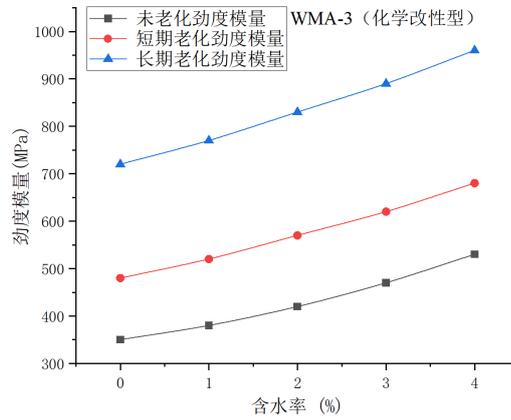


Figure 6. The stiffness modulus of warm-mix asphalt under different test conditions
图 6. 不同试验工况下温拌沥青劲度模量

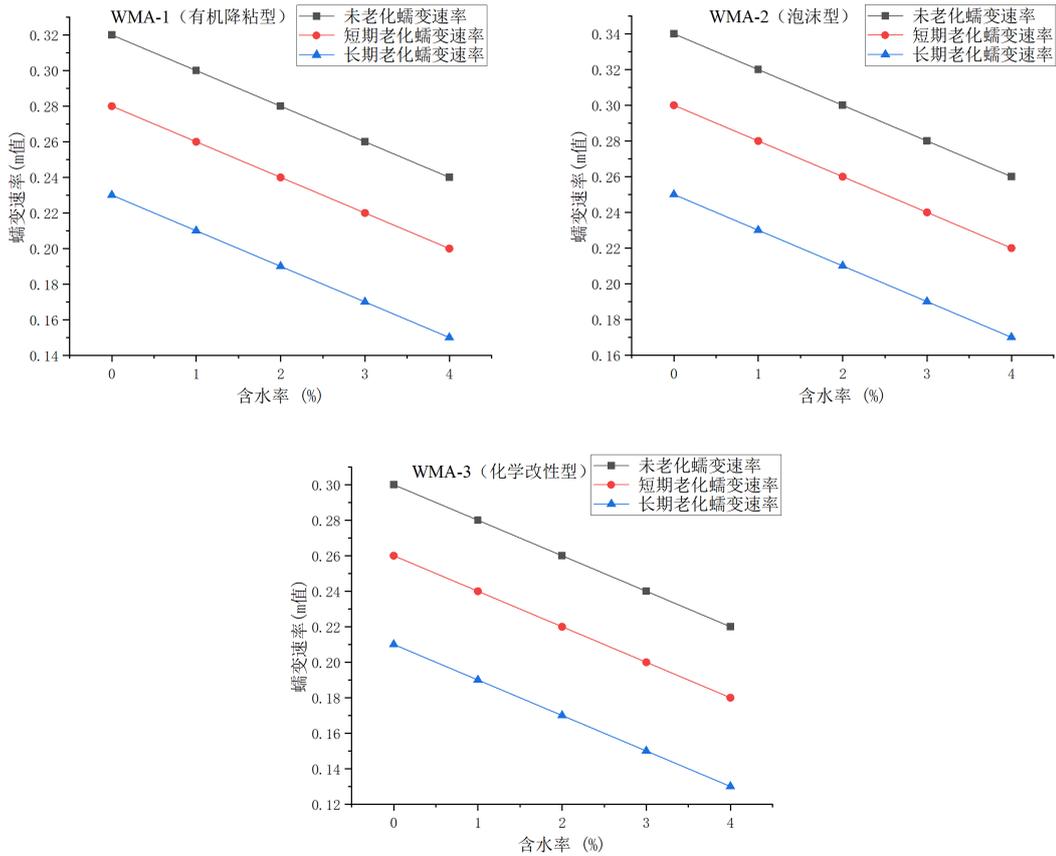


Figure 7. The creep rate of warm-mix asphalt under different test conditions
图 7. 不同试验工况下温拌沥青蠕变速率

具体分析如下：

1) 单一因素影响：含水率从0%增加到4%，未老化、短期老化、长期老化状态下，3种温拌沥青劲度模量平均增幅分别为37.5%、37.8%、38.2%，m值平均降幅分别为25.0%、25.0%、26.1%，表明水分侵入会增强沥青低温脆性，削弱其低温变形能力，且老化程度加深会进一步放大水分的劣化作用；老化

程度从无到长期老化, 0%、2%、4%含水率下, 劲度模量平均增幅分别为 112.5%、110.0%、100.0%, m 值平均降幅分别为 28.1%、28.6%、29.6%, 表明老化会显著提升沥青低温刚性, 降低其蠕变能力, 加剧低温开裂风险; 相同含水率和老化状态下, 劲度模量大小排序为 WMA-3 > WMA-1 > WMA-2, m 值大小排序为 WMA-2 > WMA-1 > WMA-3, 表明泡沫型温拌剂可有效改善沥青低温流变性能, 化学改性型温拌剂则会劣化沥青低温抗裂能力。

2) 耦合作用影响: 方差分析结果显示, 温拌剂类型(A)、含水率(B)、老化程度(C)及两两交互作用(A × B、A × C、B × C)对劲度模量和 m 值的影响均达到极显著水平($p < 0.01$), 三因素交互作用达到显著水平($p < 0.05$)。影响权重排序为 $C > B > A > B \times C > A \times C > A \times B > A \times B \times C$ 。在长期老化 + 4%含水率耦合工况下, WMA-3 的劲度模量达 960 MPa, 较未老化 + 0%含水率工况增加 610 MPa, 增幅 174.3%, m 值仅为 0.13, 降幅 56.7%; 而 WMA-2 的劲度模量为 840 MPa, 增幅 189.7%, m 值为 0.17, 降幅 50.0%, 尽管劲度模量增幅略大, 但绝对值仍低于 WMA-3, 且 m 值更高, 表明泡沫型温拌剂在高含水率 + 长期老化耦合工况下仍保持更优的低温抗裂性能。

3.3. 温拌剂类型 - 含水率 - 老化程度对水稳定性的耦合影响

3.3.1. 水煮法粘附等级

不同试验工况下温拌沥青与集料的水煮法粘附等级测试结果见图 8。粘附等级越高, 表明沥青与集料的界面粘附性越好, 抗水剥离能力越强。由图可知, 粘附等级随含水率增加呈显著降低趋势, 随老化程度加深呈显著降低趋势, 温拌剂类型对粘附等级的影响差异显著。

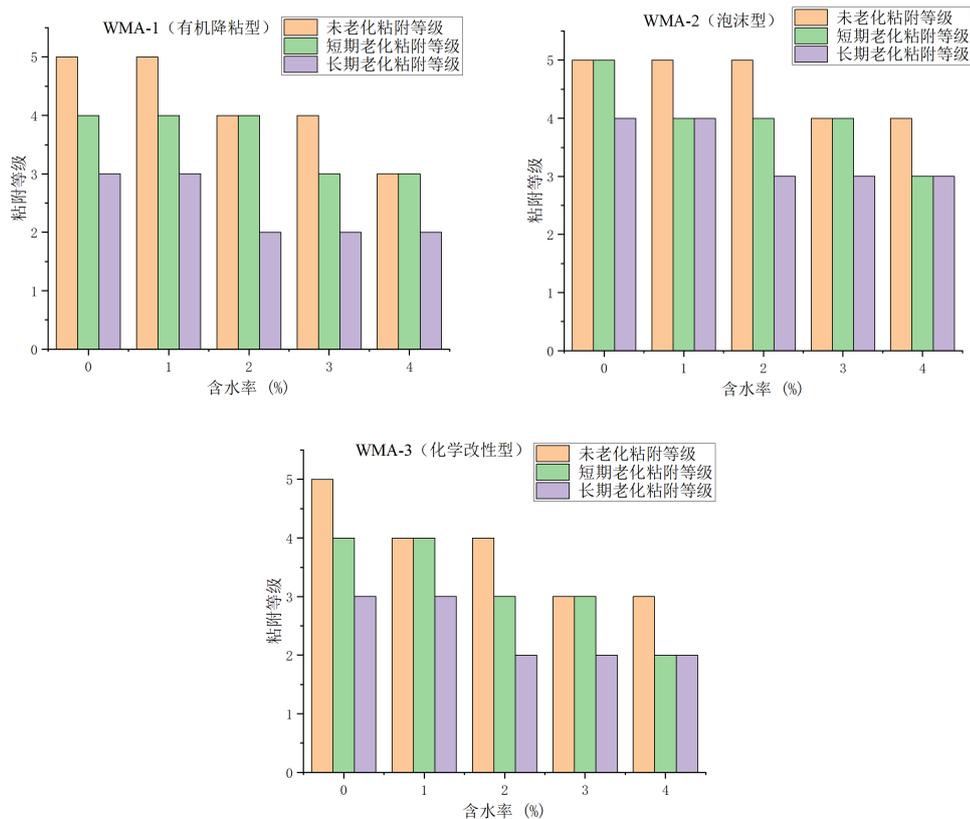


Figure 8. Test results of the water-boiling adhesion grade of warm-mix asphalt and aggregates under different test conditions
图 8. 不同试验工况下温拌沥青与集料的水煮法粘附等级测试结果

具体分析如下：

1) 单一因素影响：含水率从 0%增加到 4%，未老化、短期老化、长期老化状态下，3 种温拌沥青粘附等级平均降低 0.8 级、0.8 级、0.6 级，表明水分会破坏沥青与集料的界面粘附，导致沥青膜易剥落，且低老化程度下水分的破坏作用更显著；老化程度从无到长期老化，0%、2%、4%含水率下，粘附等级平均降低 1.2 级、1.4 级、1.0 级，表明老化会改变沥青化学组成，降低其与集料的粘附能力，且中等含水率下老化的劣化效应更突出；相同含水率和老化状态下，粘附等级大小排序为 WMA-2 ≥ WMA-1 > WMA-3，表明泡沫型温拌剂可增强沥青与集料的界面粘附性，化学改性型温拌剂则削弱了界面粘附能力。

2) 耦合作用影响：在长期老化 + 4%含水率耦合工况下，WMA-3 的粘附等级仅为 2 级，较未老化 + 0%含水率工况降低 3 级，降幅 60.0%；WMA-1 的粘附等级为 2 级，降低 3 级，降幅 60.0%；而 WMA-2 的粘附等级为 3 级，仅降低 2 级，降幅 40.0%，表明泡沫型温拌剂在高含水率 + 长期老化耦合工况下仍具有较强的抗水剥落能力。

3.3.2. 冻融劈裂强度比(TSR)

不同试验工况下温拌沥青混合料冻融劈裂强度比(TSR)测试结果见图 9。TSR 值越高，表明混合料水稳定性越好，TSR ≥ 80%为合格。由图 9 可知，TSR 值随含水率增加呈显著降低趋势，随老化程度加深呈显著降低趋势，温拌剂类型对 TSR 值的影响差异显著。

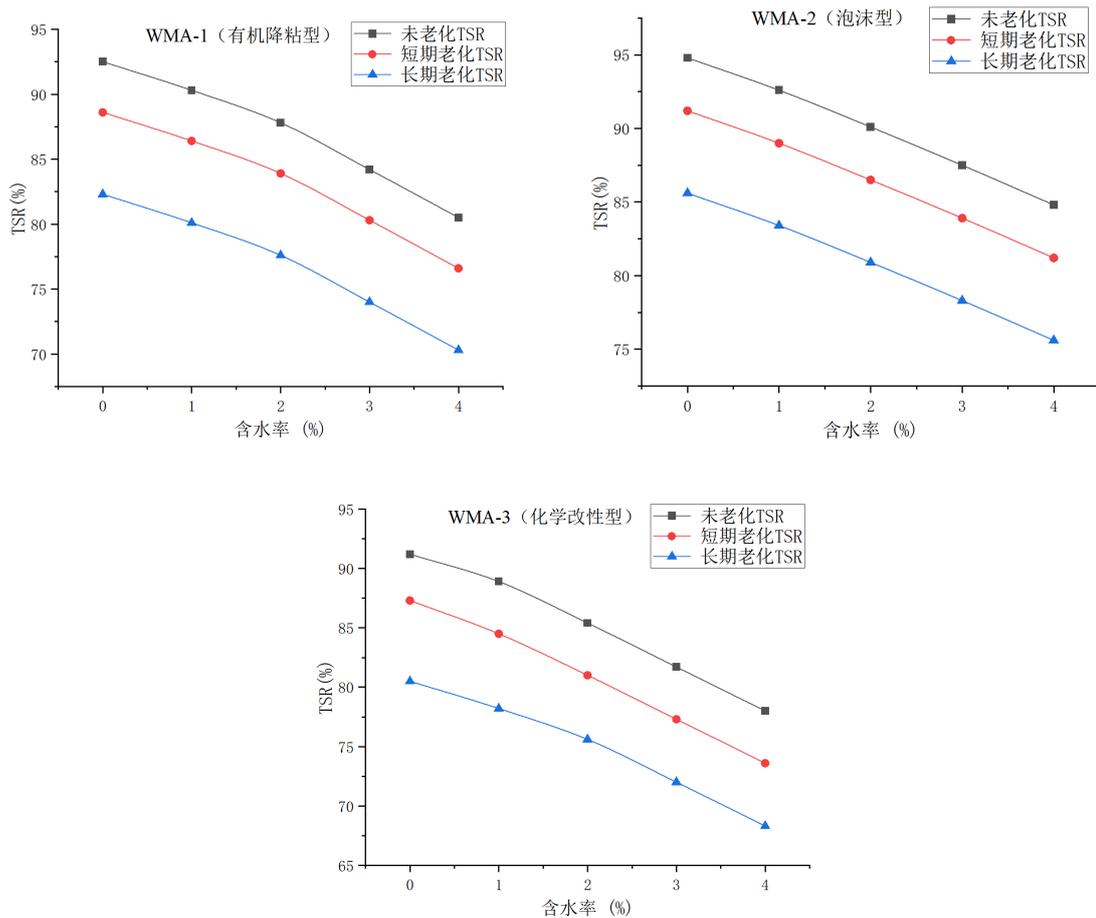


Figure 9. The frost-thaw splitting strength ratio of warm-mix asphalt mixtures under different test conditions
图 9. 不同试验工况下温拌沥青混合料冻融劈裂强度比

具体分析如下：

1) 单一因素影响：含水率从 0%增加到 4%，未老化、短期老化、长期老化状态下，3 种温拌沥青混合料 TSR 值平均降幅分别为 13.4%、13.6%、13.8%，表明水分会加剧冻融循环对混合料结构的破坏，降低水稳定性，且老化程度加深会增强水分的负面效应；老化程度从无到长期老化，0%、2%、4%含水率下，TSR 值平均降幅分别为 12.1%、12.5%、12.8%，表明老化会降低混合料的密实度和界面粘结力，使冻融破坏更易发生；相同含水率和老化状态下，TSR 值大小排序为 WMA-2>WMA-1>WMA-3，表明泡沫型温拌剂可显著提升混合料水稳定性，化学改性型温拌剂则不利于水稳定性提升。

2) 耦合作用影响：在长期老化 + 4%含水率耦合工况下，WMA-3 的 TSR 值仅为 68.3%，低于 80% 的合格标准，较未老化 + 0%含水率工况降低 22.9 个百分点，降幅 25.1%；WMA-1 的 TSR 值为 70.3%，同样低于合格标准，降低 22.2 个百分点，降幅 24.0%；而 WMA-2 的 TSR 值为 75.6%，虽未达合格标准，但仍高于 WMA-1 和 WMA-3，仅降低 29.2 个百分点，降幅 18.9%，表明泡沫型温拌剂在极端耦合工况下仍具有相对较好的水稳定性。

3.4. 多因素耦合作用显著性及预测模型

3.4.1. 方差分析(ANOVA)结果

以延度、64℃车辙因子、-16℃劲度模量及 TSR 值为代表性性能指标进行方差分析，量化温拌剂类型(A)、含水率(B)、老化程度(C)及交互作用对各性能指标的影响显著性，结果见表 3。由表 3 可知，各主效应因素(A、B、C)及两两交互作用(A×B, A×C, B×C)对各性能指标的影响均达到极显著水平($p < 0.01$)，三因素交互项(A×B×C)对各性能指标亦达到显著水平($p < 0.05$)，但其贡献率相对较低。整体来看，老化程度是影响温拌沥青性能演化的主导因素。

Table 3. Analysis of variance result table

表 3. 方差分析结果表

性能指标	影响因素	F 值	p 值
延度	A (温拌剂类型)	42.86	<0.01
	B (含水率)	68.32	<0.01
	C (老化程度)	95.64	<0.01
	A × B	18.45	<0.01
	A × C	22.37	<0.01
	B × C	25.78	<0.01
	A × B × C	8.96	0.018
64℃车辙因子	A (温拌剂类型)	45.23	<0.01
	B (含水率)	65.47	<0.01
	C (老化程度)	98.76	<0.01
	A × B	17.89	<0.01
	A × C	21.54	<0.01
	B × C	24.32	<0.01
	A × B × C	8.21	0.026

续表

-16℃劲度模量	A (温拌剂类型)	40.12	<0.01
	B (含水率)	70.34	<0.01
	C (老化程度)	92.56	<0.01
	A × B	19.23	<0.01
	A × C	23.15	<0.01
	B × C	26.45	<0.01
	A × B × C	9.12	0.021
	TSR 值	A (温拌剂类型)	43.56
B (含水率)		67.89	<0.01
C (老化程度)		96.34	<0.01
A × B		18.12	<0.01
A × C		22.67	<0.01
B × C		25.43	<0.01
A × B × C		8.78	0.032

根据平方和贡献率分析结果,各因素对性能指标的影响程度排序均为:老化程度(C) > 含水率(B) > 温拌剂类型(A)。交互作用中,含水率与老化程度交互项(B × C)贡献率最大,其次为 A × C 和 A × B,而三因素交互项(A × B × C)贡献率最小但仍达到显著水平,表明老化效应在温拌沥青性能演化中起主导作用,且含水率与老化程度的交互作用对性能劣化的驱动作用最为突出。

3.4.2. 性能预测模型

基于正交试验数据,以温拌剂类型(A,赋值:WMA-1=1、WMA-2=2、WMA-3=3)、含水率(B,%)、老化程度(C,赋值:未老化=1、短期老化=2、长期老化=3)为自变量,以延度(Y_1 , cm)、64℃车辙因子(Y_2 , Pa)、-16℃劲度模量(Y_3 , MPa)及冻融劈裂强度比(Y_4 , %)为因变量,建立多元线性回归预测模型。通过显著性检验($p < 0.01$)验证模型有效性。进一步对模型残差进行独立性与正态性检验,结果表明残差呈随机分布,无明显系统偏差,说明模型拟合合理且不存在明显过拟合现象。最终得到各性能指标的预测方程如下:

1) 延度预测模型:

$$Y_1 = 142.3 - 8.5A - 5.2B - 22.8C + 1.1AB + 2.3AC + 3.5BC - 0.8ABC \quad (R^2 = 0.968, F = 186.3, p < 0.01)$$

2) 64℃车辙因子预测模型:

$$Y_2 = 2150 + 120A - 140B + 830C - 15AB - 28AC - 42BC + 6ABC \quad (R^2 = 0.972, F = 203.5, p < 0.01)$$

3) -16℃劲度模量预测模型:

$$Y_3 = 180 + 45A + 32B + 250C - 4AB - 8AC - 12BC + 2ABC \quad (R^2 = 0.965, F = 178.2, p < 0.01)$$

4) 冻融劈裂强度比(TSR)预测模型:

$$Y_4 = 105.6 - 3.2A - 3.8B - 10.5C + 0.4AB + 0.8AC + 1.2BC - 0.2ABC \quad (R^2 = 0.970, F = 195.7, p < 0.01)$$

为验证预测模型的准确性,选取 10 组未参与模型构建的试验数据(涵盖 3 种温拌剂、不同含水率及老化阶段)进行验证,计算预测值与实测值的相对误差,结果见表 4。各性能指标预测值与实测值的相对误差均小于 5%,表明建立的多元线性回归模型具有较高的精度,可用于不同“温拌剂类型-含水率-老化程度”耦合工况下温拌沥青性能的定量预测。

Table 4. Calculating the relative error between the predicted value and the measured value
表 4. 计算预测值与实测值的相对误差

温拌剂类型	含水率/%	老化程度	延度 (实测/ 预测)/cm	相对 误差/%	车辙因子 (实测/ 预测)/Pa	相对 误差/%	劲度模量 (实测/ 预测)/MPa	相对 误差/%	TSR (实测/ 预测)/%	相对 误差/%
WMA-1	1.5	未老化	105/102.8	2.1	2790/2825	1.2	370/362	2.2	91.4/92.1	0.8
WMA-1	2.5	短期老化	72/74.3	3.2	3230/3185	1.4	555/548	1.3	82.1/80.5	2.0
WMA-1	3.5	长期老化	48/49.5	3.1	3830/3875	1.2	870/885	1.7	72.2/73.6	1.9
WMA-2	1.5	未老化	112/114.5	2.2	2950/2910	1.4	340/335	1.5	93.5/94.2	0.7
WMA-2	2.5	短期老化	79/81.2	2.7	3390/3430	1.2	515/522	1.3	85.2/86.7	1.7
WMA-2	3.5	长期老化	55/56.8	3.2	3990/4035	1.1	810/822	1.5	76.9/78.3	1.8
WMA-3	1.5	未老化	99/97.2	1.8	2690/2730	1.5	400/408	2.0	90.1/91.5	1.5
WMA-3	2.5	短期老化	66/68.5	3.8	3110/3075	1.1	595/602	1.2	82.6/81.2	1.7
WMA-3	3.5	长期老化	42/43.6	3.7	3790/3840	1.3	925/918	0.8	70.1/71.5	2.0
平均值	-	-	-	2.7	-	1.3	-	1.5	-	1.5

4. 结语

本研究通过构建“温拌剂类型 - 含水率 - 老化程度”三维试验矩阵，系统揭示了三者单独及耦合作用对温拌沥青性能的影响规律，结合方差分析与预测模型，深化了对温拌沥青性能劣化机制的认知，主要结论如下：

1) 温拌剂类型、含水率及老化程度对温拌沥青物理性能、流变性能及水稳定性均存在显著影响；主效应及两两交互作用达到极显著水平($p < 0.01$)，三因素交互作用达到显著水平($p < 0.05$)。基于平方和贡献率分析，各因素影响程度排序为：老化程度 > 含水率 > 温拌剂类型；交互作用中含水率 - 老化程度项贡献率最大，而三因素交互作用贡献率最小但仍显著。贡献率分析表明老化因素主导性能演化，该结果与材料热氧老化机理一致。

2) 不同温拌剂性能表现差异显著：泡沫型温拌剂(WMA-2)在各工况下均表现最优，抗水损害及抗老化能力突出；有机降粘型温拌剂(WMA-1)综合性能中等；化学改性型温拌剂(WMA-3)在高含水率、长期老化耦合工况下性能衰减最显著，不适合复杂环境应用。

3) 含水率每增加1%，未老化、短期老化、长期老化状态下温拌沥青延度平均下降5.2%、8.7%、12.3%，老化程度加剧了水分对沥青性能的劣化效应；长期老化 + 4%含水率为最不利耦合工况，该工况下 WMA-3 的 TSR 值仅为 68.3%，低于合格标准。

4) 建立的多元线性回归预测模型($R^2 \geq 0.965$)可准确预测不同耦合工况下温拌沥青的关键性能指标，相对误差小于 5%，为工程实践中温拌剂选型、含水率控制及路面耐久性评估提供了量化工具。

参考文献

- [1] 梁波, 张海涛, 梁缘, 等. 温拌沥青技术研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 24-46.
- [2] 魏建国, 梁钰熹, 黄美燕, 等. 温拌沥青结合料高低温性能指标评价研究[J]. 森林工程, 2025, 41(2): 417-429.
- [3] 徐永丽, 杨煦兰, 周吉森, 等. 温拌沥青的沥青烟成分及温拌剂抑烟性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(6): 1701-1707.

- [4] 周璐, 黄卫东, 吕泉, 等. 不同改性剂对沥青黏结及抗水损害性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 377-384.
- [5] 郭猛, 任鑫, 焦峪波, 等. 沥青及沥青混合料老化与抗老化研究综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 41-59.
- [6] 董昭, 徐书东, 柳久伟, 等. 不同类型温拌剂对沥青性能影响[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(1): 18-24.
- [7] 罗婷, 王嘉昕, 谢斌, 等. 不同温拌剂对高黏沥青老化性能的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(13): 106-114.
- [8] 任小遇, 李波, 王永宁, 等. 紫外老化及温拌剂种类对温拌 SBS 改性沥青官能团的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(6): 971-976.
- [9] 韩春利, 黄维蓉, 杨玉柱, 等. 两种温拌剂对沥青混合料性能的影响研究[J]. 公路交通技术, 2020, 36(3): 26-30, 41.
- [10] 张霞, 黄刚, 刘昭, 等. 热、光、水耦合老化条件对温拌沥青性能的影响[J]. 公路交通科技, 2019, 36(7): 10-19.