



基于响应曲面法的岩抗 SBS 复合再生沥青性能优化

刘 淇¹,王修山²,李震南¹,俞烨炜¹,胡奕琦¹

(1. 浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018;2. 浙江建设职业技术学院建筑设备学院,杭州 311231)

摘要: 为充分利用老化沥青,提出了一种岩抗 SBS 复合再生沥青的制备方法。首先,采用岩沥青和抗剥落剂复改性 SBS 沥青,制得岩沥青/抗剥落剂复合改性沥青,并采用响应曲面法得到岩沥青和抗剥落剂的最优掺量;其次,将复合改性沥青与老化沥青掺和制备岩抗 SBS 复合再生沥青,并采用再生沥青调和理论模型验证性能提升效果。研究表明,岩沥青和抗剥落剂能提高沥青性能,岩沥青掺量 8.5% 和抗剥落剂掺量 0.4% 时复合改性沥青性能最佳。再生沥青调和理论模型可应用于该制备方法。复合改性沥青掺量达 30% 时对老化沥青性能提升效果最显著:残留针入度比达最大(76.5%),软化点增量最小(1.9℃),延度比达最大(62.4%)。该研究可为老化沥青的资源化利用及再生沥青的制备提供参考。

关键词: 沥青改性;再生沥青;响应曲面法;SBS 改性沥青;再生沥青调和理论模型

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2025)07-0523-10

引用格式: 刘淇,王修山,李震南,等. 基于响应曲面法的岩抗 SBS 复合再生沥青性能优化[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2025,53(4):523-532.

Reference Format: LIU Qi, WANG Xiushan, LI Zhenan, et al. Optimization of performance of rock-resistant SBS composite regenerated asphalt based on response surface methodology[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(4): 523-532.

Optimization of performance of rock-resistant SBS composite regenerated asphalt based on response surface methodology

LIU Qi¹, WANG Xiushan², LI Zhenan¹, YU Yewei¹, HU Yiqi¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Construction Equipment, Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China)

Abstract: To fully utilize aged asphalt, a preparation method for rock-resistant SBS composite rejuvenated asphalt was proposed. First, rock asphalt and anti-stripping agent were blended to modify SBS asphalt, producing a rock asphalt/anti-stripping agent composite modified asphalt. The optimal dosages of rock asphalt and the anti-stripping agent were determined using the response surface methodology. Then, this composite modified asphalt was blended with aged asphalt to prepare the rock-resistant SBS composite rejuvenated asphalt, and the performance improvement was verified using a rejuvenated asphalt blending theory model. Results show that rock asphalt and anti-stripping agent enhance asphalt performance, with the best composite modified asphalt performance at 8.5% rock asphalt and 0.4% anti-stripping agent. The rejuvenated asphalt blending theory model is applicable to this preparation method. When the composite modified asphalt content reaches 30%, the performance improvement of aged asphalt is most significant: the maximum residual penetration ratio (76.5%), the minimum softening point increment (1.9℃), and the maximum elongation ratio (62.4%). The research offers reference for aged asphalt recycling and

收稿日期: 2024-12-05 网络出版日期: 2025-04-03

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LGF22E080016)

作者简介: 刘 淇(2000—),男,浙江丽水人,硕士研究生,主要从事道路工程、道桥建筑材料方面的研究。

通信作者: 王修山, E-mail: wxs77777@163.com

rejuvenated asphalt preparation.

Key words: asphalt modification; reclaimed asphalt; response surface methodology; SBS modified asphalt; reclaimed asphalt blending theory model

0 引 言

沥青路面具有施工简便、行车舒适等特点,中国 90%以上的高速公路均采用沥青铺筑。由于复杂的环境因素和不断增加的重载交通负担,沥青路面会出现不同程度的老化现象,使得路用性能降低^[1-3]。全面修复沥青路面的一种有效方法是对现有路面进行铣刨,重新铺设新的沥青,但这一过程会产生大量废弃沥青混合料。当前,如何处理修复过程中产生的废弃混合料已成为现代化公路建设的主要难点之一。为提高废弃沥青混合料的利用率,通常采用沥青路面热再生技术对沥青路面回收旧料(Reclaimed asphalt pavement, RAP)进行循环再利用。该技术不仅可以有效解决大量铣刨后废弃沥青混合料的处理难题,而且可以节省材料成本^[4]。

众多研究者对沥青老化情况开展研究。左锋等^[5]认为, RAP 掺量的适宜比例对于保证再生沥青混合料的性能非常重要;田小草等^[6]通过实验和基于菲克第二定律的数学模型构建了适合新旧沥青混溶体系的扩散模型,探讨了不同扩散时间、温度下再生沥青的扩散规律,分析了新旧沥青扩散融合的动态过程,为沥青再生技术提供了理论支持;Li 等^[7]对沥青混合料进行了自然老化与长期老化试验,发现长期压力老化无法准确反映自然老化趋势和特性,而自然老化法更适于模拟道路沥青结合料老化过程;原广晨^[8]研究发现,加速老化在微观层面不能很好地模拟自然老化。综上所述,研究者为了模拟实际道路沥青老化情况,通常使用自然老化后的沥青。因此,本文选择自然老化的道路铣刨 RAP 旧料作为老化材料。

传统改性沥青研究方法通常需要依靠大量性能试验,但该方法存在试验组数多、材料消耗量大、耗时与成本高等缺点,因此有必要采用更加高效的方法来探究性能与参数之间的关系。响应曲面法(Response surface methodology, RSM)能够提升试验的有效性和准确性,可以在减少试验次数的同时准确预测沥青性能与参数关系,省时省材。该方法已经广泛应用于沥青混合料的配比优化^[9-10]和设计^[11-13]中。马峰等^[14]采用响应曲面法来优化玄武岩纤维掺量、纳米 TiO₂/ZnO 掺量及油石比,显著

提升了复合改性沥青混合料的水稳定性和高温性能;白中良等^[15]基于响应曲面法研究了沥青再生剂配比设计以及抗老化性能,发现沥青老化时需超 45%重质组分用来保证沥青的热稳定性;王丽丽等^[16]通过响应曲面法优化了大比例厂拌热再生混合料的配比,并优化了动稳定度和冻融劈裂强度比等参数。综上可知,响应曲面法可以优化沥青再生剂配方和混合料内部组分配比,有望对再生沥青配比起到预测和优化作用。

从 RAP 旧料中提取的老化沥青在性能上存在明显不足,需针对性选择岩沥青和抗剥落剂对老化沥青进行性能改良。在沥青制备的过程中引入岩沥青作为抗老化剂,不仅能够显著提升沥青的性能,还能有效延长其使用寿命^[17-18]。此外,抗剥落剂能够抑制老化沥青在低温时的性能退化,并增强沥青与集料的黏附性,从而提高路面的整体耐久性^[19-20]。

本文采用岩沥青和抗剥落剂为改性剂,对未老化 SBS 改性沥青进行改性,并采用响应曲面法研究岩沥青/抗剥落剂复合改性沥青(Burdun rock asphalt/LY-KJ anti-stripping agent composite modified asphalt,简称 LKB 沥青)的性能,获得岩沥青和抗剥落剂的最佳掺量;将 LKB 沥青与 RAP 中提取出来的老化沥青进行掺和,制备岩抗 SBS 复合再生沥青(Burdun rock asphalt/LY-KJ anti-stripping agent-SBS composite rejuvenated asphalt,简称 LKB-S 沥青),并采用再生沥青调和理论模型验证 LKB 沥青对老化沥青性能的提升效果,以为老化沥青的再生利用以及复合再生沥青的性能优化提供思路。

1 材料与试验

1.1 材 料

试验材料的基本性能指标参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011,以下简称《试验规程》)。原样沥青选用 SBS 改性沥青(I-D),其主要参数见表 1;选用的岩沥青呈黑褐色颗粒状,其主要参数见表 2;选用的抗剥落剂采用 LY-KJ 型抗剥落剂,其主要参数见表 3。

1.2 老化沥青的提取及性能

本文所使用的 RAP 旧料取自金华地区通过铣

刨工艺收集的废旧路面。在确保 RAP 的含水率符合相关规范要求的前提下,采用离心抽提试验法,对样本进行沥青含量的测定,并依据《试验规程》进行计算并分析,最终确定其沥青的平均含量为 4.0%。沥青抽提设备由沥青混合料快速分离机、矿粉离心机、清洗机及沥青抽提仪等组成。根据《试验规程》对老化沥青的密度、针入度、延度和软化点进行测定,具体试验结果见表 4。与通用 SBS 改性沥青相比较,老化沥青的针入度、延度和软化点均低于 SBS 改性沥青,说明老化沥青确实发生了老化现象。

| 表 1 SBS 改性沥青(I-D)的主要参数 | | |
|-------------------------------|-----------|-------|
| 主要参数 | 规范要求 | 检测结果 |
| 25 ℃针入度/(0.1 mm) | 40.0~60.0 | 51.4 |
| 5 ℃延度/cm | ≥20.0 | 26.3 |
| 软化点/℃ | ≥60.0 | 78.0 |
| 针入度指数 PI | ≥0.00 | 0.16 |
| 135 ℃动力黏度/(Pa·s) | ≤3.0 | 2.1 |
| 密度(25 ℃)/(g·cm ³) | | 1.019 |
| 溶解度/% | ≥99.0 | 99.5 |
| 闪点/℃ | ≥230 | 281 |
| 黏附性/级 | | 4 |

| 表 2 岩沥青的主要参数 | | |
|--------------------------|--------|------|
| 主要参数 | 规范要求 | 检测结果 |
| 灰分含量/% | ≤80.0 | 72.5 |
| 沥青含量/% | >25.0 | 27.8 |
| 含水率/% | ≤2.00 | 0.15 |
| 相对密度 | | 1.72 |
| 闪点/℃ | | 306 |
| 粒度≥4.75 mm 的质量占比/% | 100 | 100 |
| 粒度为 2.36~4.75 mm 的质量占比/% | 95~100 | 97 |
| 粒度为 1.18~2.36 mm 的质量占比/% | >80 | 87 |

| 表 3 LY-KJ 型抗剥落剂的主要参数 | | |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| 主要参数 | 规范要求 | 检测结果 |
| 外观 | 色泽均匀、液态抗剥落剂无分层、斑点等异常情况 | 色泽均匀、液态抗剥落剂无分层、斑点等异常情况 |
| 气味 | 使用中无明显外散刺激性气味 | 使用中无明显外散刺激性气味 |
| 密度(15 ℃)/(g·cm ³) | 0.950~1.050 | 1.011 |
| pH 值 | >7.0 | 7.8 |
| 闪点/℃ | ≥230 | 281 |
| 改性沥青+抗剥落剂的黏附性/级 | ≥5 | 5 |
| 改性沥青+抗剥落剂(老化后)的黏附性/级 | ≥3 | 5 |
| 水分及挥发性物质含量/% | ≤10.0 | 4.1 |

| 表 4 老化沥青主要参数 | |
|-------------------------------|-------|
| 主要参数 | 测试值 |
| 密度(25 ℃)/(g·cm ³) | 1.020 |
| 25 ℃针入度/(0.1 mm) | 21.6 |
| 5 ℃延度/cm | 11.6 |
| 软化点/℃ | 72.4 |

1.3 沥青制备

1.3.1 LKB 沥青制备

本文在 SBS 改性沥青中混掺不同质量百分比的岩沥青与抗剥落剂 LY-KJ,以制备多组不同岩沥青与抗剥落剂掺量的 LKB 沥青。具体制备流程如下:首先,将 SBS 改性沥青放入 165 ℃的烘箱中加热 3 h;熔融后将沥青置于电炉上,加热至 175~185 ℃;然后在高速分散机低速搅拌下,加入岩沥

青;随后调整温度和转速,高速剪切 30 min。其次,将抗剥落剂加入已剪切的岩沥青改性沥青中,调整转速和温度,低速剪切 30 min;剪切完成后,用搅拌器搅拌 30 min。最后,将沥青置于 165 ℃的烘箱中,静置 30 min,完成复掺沥青的制备。

1.3.2 LKB-S 沥青制备

在旧沥青中掺拌不同质量百分比的 LKB 沥青,以制备不同 LKB 沥青含量的 LKB-S 沥青,具体流程如下:首先,将 LKB 沥青和回收的老化沥青放入 165 ℃烘箱中,预热至流动状态;其次,将预热后的两种沥青进行混合,以旧沥青质量为基准,分别加入质量比为 10%、20%、30%、40%、50%的 LKB 沥青,在 175~185 ℃的温度下,用搅拌器搅拌混合后的再生沥青 30 min;最后,搅拌完成后,将再生沥青

放入 165 ℃烘箱中静置 30 min,完成再生 LKB-S 沥青的制备。

2 基于响应曲面法确定最佳掺量

2.1 Box-Behnken 法试验设计

Box-Behnken 法试验设计是一种基于响应曲面法的优化试验设计,主要用于多变量系统的优化^[21]。该试验设计通过在试验空间的中等水平区域安排试验点,避免因子处于极端水平,从而减少试验次数,降低极端条件不稳定风险。该试验设计基于球形区域,将得到的试验结果分布在立方体棱边中点,利用二次回归模型拟合因素与响应关系,得到预测模型以分析最优条件。

Box-Behnken 法试验设计通过 2 个因素(岩沥青掺入量和抗剥落剂掺入量)以及 3 个水平(−1、0、

1)来进行试验,具体因素和编码水平见表 5。

表 5 因素和编码水平

| 编码水平 | 因素 | |
|------|----------|-----------|
| | 岩沥青掺入量/% | 抗剥落剂掺入量/% |
| −1 | 6 | 0.1 |
| 0 | 8 | 0.5 |
| 1 | 10 | 0.9 |

2.2 试验结果

本文借助 Design-Expert 软件完成试验。设定岩沥青的掺入量 X_1 和抗剥落剂 LY-KJ 的掺入量 X_2 为自变量,以原样的针入度 Y_1 、延度 Y_2 、软化点 Y_3 、TFOT 老化后的针入度 Y_4 、TFOT 老化后的延度 Y_5 、TFOT 老化后的软化点 Y_6 为响应值,进行 17 组试验,具体试验安排以及每组试验结果见表 6。

表 6 Box-Behnken 试验安排与结果

| 试验编号 | X_1 /% | X_2 /% | $Y_1/(0.1\text{ mm})$ | Y_2/cm | $Y_3/^\circ\text{C}$ | $Y_4/(0.1\text{ mm})$ | Y_5/cm | $Y_6/^\circ\text{C}$ |
|------|----------|----------|-----------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 8 | 0.1 | 40.8 | 22.8 | 74.4 | 31.6 | 10.4 | 76.5 |
| 2 | 10 | 0.5 | 38.6 | 23.1 | 72.7 | 32.5 | 11.5 | 75.9 |
| 3 | 8 | 0.9 | 37.8 | 23.5 | 71.9 | 32.4 | 11.2 | 76.2 |
| 4 | 6 | 0.9 | 44.6 | 24.4 | 75.6 | 33.6 | 10.8 | 77.9 |
| 5 | 8 | 0.5 | 36.4 | 16.5 | 79.5 | 29.5 | 8.8 | 82.4 |
| 6 | 6 | 0.5 | 37.2 | 16.4 | 79.3 | 29.1 | 8.6 | 82.1 |
| 7 | 10 | 0.1 | 34.4 | 17.6 | 78.2 | 30.2 | 9.2 | 81.7 |
| 8 | 8 | 0.1 | 35.3 | 17.9 | 77.6 | 30.6 | 9.5 | 81.5 |
| 9 | 10 | 0.5 | 35.1 | 17.6 | 77.4 | 30.1 | 9.1 | 82.1 |
| 10 | 8 | 0.5 | 33.6 | 17.0 | 78.4 | 29.8 | 8.9 | 81.4 |
| 11 | 6 | 0.1 | 34.9 | 17.1 | 78.1 | 30.4 | 8.6 | 82.3 |
| 12 | 8 | 0.5 | 37.4 | 18.8 | 79.3 | 30.9 | 8.7 | 82.8 |
| 13 | 8 | 0.5 | 36.9 | 18.4 | 80.4 | 31.5 | 8.5 | 82.4 |
| 14 | 6 | 0.5 | 34.3 | 13.4 | 82.3 | 27.9 | 7.4 | 84.9 |
| 15 | 10 | 0.9 | 32.4 | 14.3 | 80.9 | 27.5 | 7.9 | 84.3 |
| 16 | 8 | 0.9 | 31.6 | 14.9 | 80.6 | 28.0 | 8.0 | 84.1 |
| 17 | 8 | 0.5 | 33.9 | 15.7 | 81.6 | 28.5 | 7.6 | 85.7 |

2.3 方差分析

采用 Design-Expert 软件,根据表 6 数据进行响应面分析,建立自变量与各响应值之间的二次回归模型,相关方程可用式(1)–(6)表示:

$$Y_1 = 34.66000 - 3.70000X_1 + 0.512500X_2 - 1.05000X_1X_2 + 0.932500X_1^2 + 2080750X_2^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 17.44000 - 4.43750X_1 + 1.02500X_2 + 0.175000X_1X_2 + 1.53000X_1^2 + 0.105000X_2^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 77.94000 + 3.85000X_1 + 0.175000X_2 - 0.475000X_1X_2 - 1.28250X_1^2 + 1.81750X_2^2 \quad (3)$$

$$Y_4 = 30.24118 - 2.27500X_1 + 0.80000X_2 \quad (4)$$

$$Y_5 = 9.06000 - 1.62500X_1 + 0.05000X_2 - 0.05000X_1X_2 + 0.495000X_1^2 - 0.505000X_2^2 \quad (5)$$

$$Y_6 = 81.80000 + 4.06250X_1 + 0.362500X_2 - 0.150000X_1X_2 - 1.42500X_1^2 + 0.875000X_2^2 \quad (6)$$

对以上 6 个回归模型进行方差分析,分析结果见表 7。由表 7 回归模型方差分析结果显示,TFOT 老化前后沥青的针入度、软化点和延度的回归模型 F 值均超过了临界值,并且模型的 P 值小于 0.05,

这表明基于试验数据建立的预测模型在统计学上显著。失拟项的 P 值用来衡量模型预测值与实际观测值之间的偏差,是评估模型拟合度的关键指标。在本文中,所有 6 个响应值的失拟项 P 值均超过 0.05,表明模型的失拟效应不显著,模型预测值与实际观测值高度吻合,模型预测的结果具有实际应用价值,回归方程的拟合效果良好。

表 7 回归模型方差分析结果

| 响应值 | 模型 F 值 | 模型 P 值 (Prob> F) | 失拟项 P 值 |
|------------------------|----------|--------------------------|-----------|
| $Y_1/(0.1\text{ mm})$ | 19.80 | 0.0004 | 0.1545 |
| Y_2/cm | 146.60 | <0.0001 | 0.5366 |
| $Y_3/^{\circ}\text{C}$ | 46.24 | <0.0001 | 0.1528 |
| $Y_4/(0.1\text{ mm})$ | 125.25 | <0.0001 | 0.3686 |
| Y_5/cm | 31.11 | <0.0001 | 0.7715 |
| $Y_6/^{\circ}\text{C}$ | 117.07 | <0.0001 | 0.5527 |

3 响应面分析与最优掺量确定

3.1 岩沥青与抗剥落剂掺量对老化前后 SBS 改性沥青针入度的影响

针入度表示沥青在特定的试验温度条件下的稠

度,反映了沥青的流变学性能^[17]。针入度试验可以反映岩沥青与抗剥落剂 LY-KJ 对 SBS 改性沥青针入度的影响,结果如图 1 所示。

由图 1 可知,随着岩沥青掺量的增加,沥青的针入度显著降低,表明加入岩沥青会导致沥青变得黏稠。岩沥青对改性沥青性能的影响机理主要有三个方面:一,岩沥青含有较多重质成分,尤其是沥青质,这些成分具有高稳定性和大分子量的特征,能提升沥青的黏度和硬度,从而增强高温稳定性;二,岩沥青的高灰分含量使其比表面积大,在吸附沥青中轻质成分的同时提升沥青的热力学稳定性^[22];三,岩沥青与 SBS 改性沥青之间的空间交联作用可以增强沥青体系的黏度,有效限制改性沥青在高温条件下的流动和变形。经过 TFOT 老化后,沥青的针入度显著降低,表明岩沥青能够显著提升沥青的抗老化能力。随着抗剥落剂掺量的增加,沥青的针入度会先降低后上升。根据图 1(c)和图 1(d)可以发现:一方面,抗剥落剂掺量的增加能持续提升沥青的针入度,表明抗剥落剂对老化后的沥青能起到积极影响;另一方面,老化后的针入度差减小,表明抗剥落剂能够提升沥青的抗老化能力。

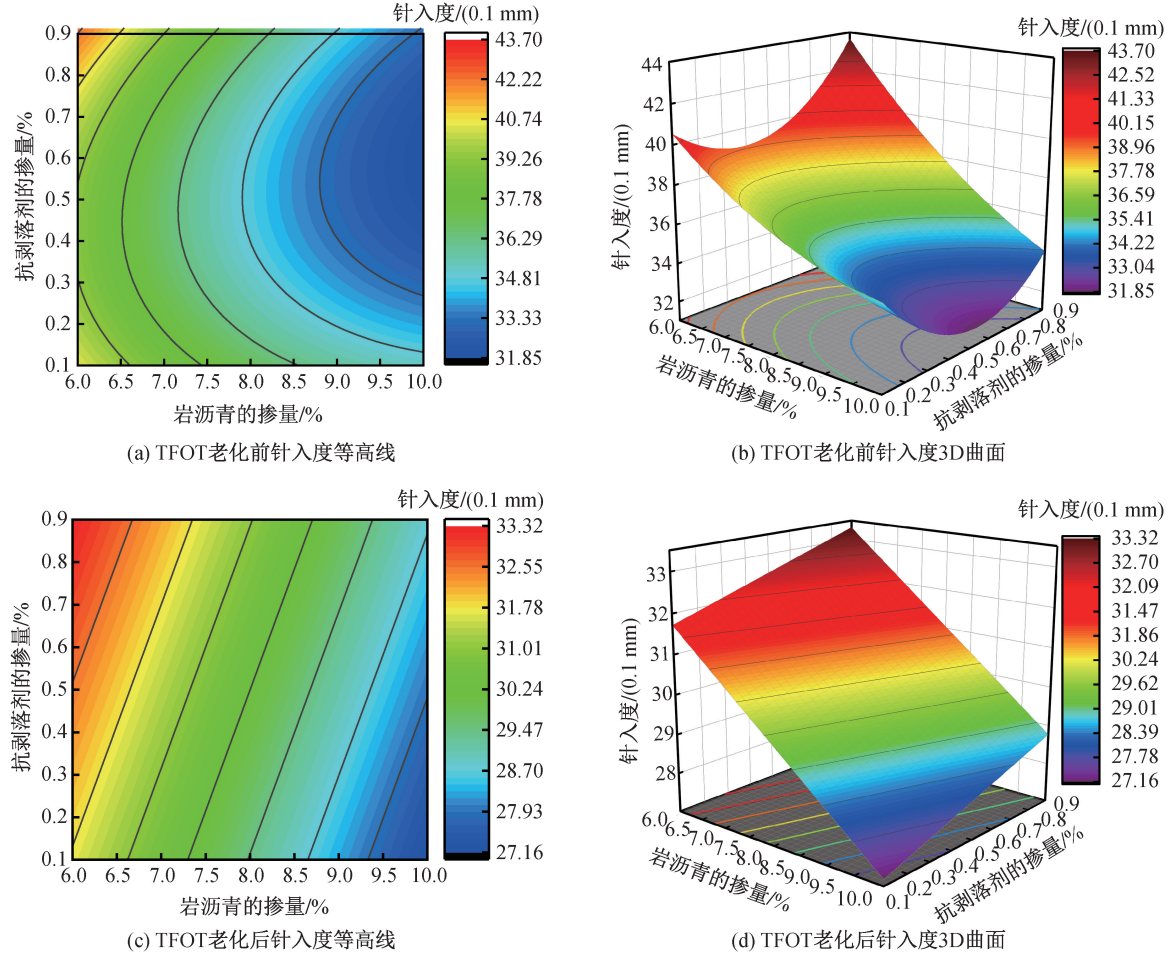


图 1 针入度试验结果

3.2 岩沥青与抗剥落剂掺量对老化前后 SBS 改性沥青延度的影响

沥青延度试验用于表征沥青的低温性能。本文通过延度试验来评价岩沥青与抗剥落剂 LY-KJ 对 SBS 改性沥青延度的影响,结果如图 2 所示。由图 2 可以发现:随着岩沥青掺量的增加,沥青的延度明显降低,表明岩沥青会对沥青的低温性能具有负面影响,在复合改性沥青的掺配中岩沥青的掺量不宜过

大;随着抗剥落剂的增加,沥青的延度会小幅度提高,表明添加抗剥落剂能够提升沥青在低温条件下的性能。这是因为抗剥落剂中部分成分与沥青内的酸性物质发生加成反应,生成氢键,从而加强了沥青分子间的相互作用,提高了沥青在低温下的性能^[19]。在 TFOT 老化后,沥青的延度大幅度下降,但会随着抗剥落剂掺量的增加出现先升高后降低的现象,也能表明抗剥落剂能增大沥青老化后的低温延展性。

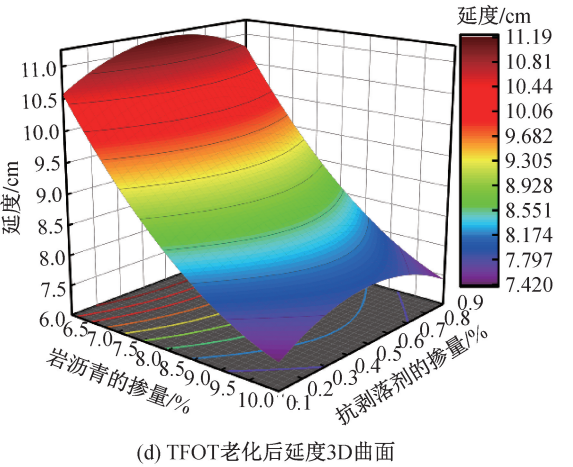
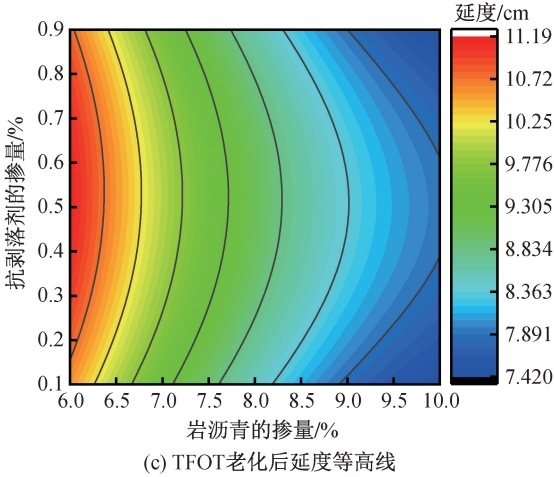
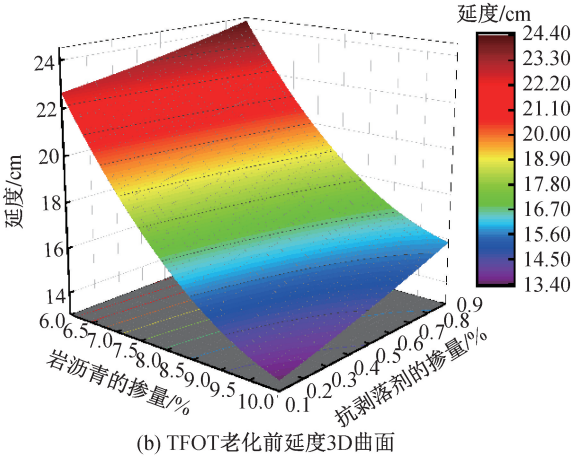
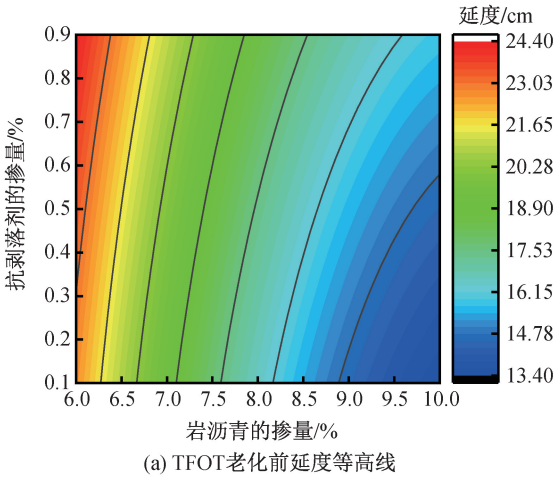


图 2 延度试验结果

3.3 岩沥青与抗剥落剂掺量对老化前后 SBS 改性沥青软化点的影响

沥青软化点试验可表征沥青的高温稳定性。本文通过软化点试验来评价岩沥青与抗剥落剂 LY-KJ 对 SBS 改性沥青软化点的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可以发现:随着岩沥青掺量的增加,沥青软化点会提高;剥落剂掺量的增加会导致沥青软化点先降低后升高。在 TFOT 老化后,沥青的软化点明显升高,表明岩沥青和抗剥落剂能提高 SBS 改性沥青的抗高温变形能力。

3.4 最优掺量确定

依据老化前后针入度、延度、软化点的试验结果,以老化前针入度不小于 3 mm、延度不小于 15 cm、软化点不小于 75 ℃以及老化后针入度取最小值、延度取最大值、软化点取最大值为优化目标,将试验结果导入软件,利用响应曲面法的 Numerical 功能预测最优掺量。按照最优结果 $X_1=8.5\%$ 、 $X_2=0.4\%$ 进行室内试验,并将针入度、软化点、延度的试验结果与响应曲面法预测值进行对比,试验结果见表 8。由表 8 可知:老化前后针入度、延度和

软化点的预测值与实测值之间的误差分别为 2.10%、3.40%、2.92%、2.27%、0.71% 和 1.21%，所有模型的预测精度都超过了 95%，这表明对回归

方程进行优化后得到的最优掺量具有可靠性，也表明响应曲面法能够准确地反映各因素对改性沥青性能的影响。

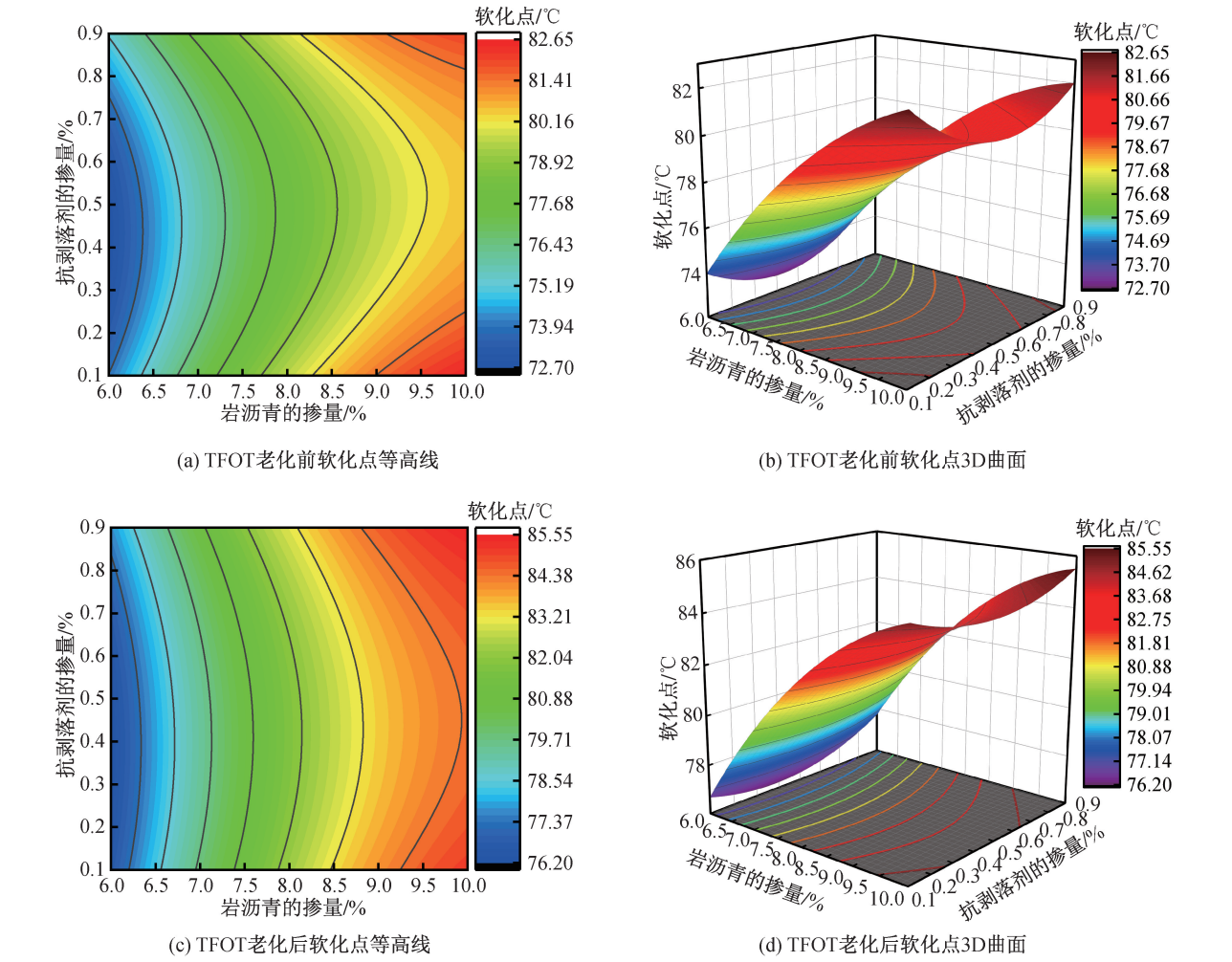


图 3 软化点试验结果

表 8 最优掺量预测结果及实测结果

| 试验项目 | 预测值 | 实测值 | 预测精度/% | 预测值与实测值的误差/% |
|--------------------|------|------|--------|--------------|
| 针入度/(0.1 mm) | 33.4 | 34.1 | 97.90 | 2.10 |
| TFOT 后针入度/(0.1 mm) | 29.4 | 28.4 | 96.60 | 3.40 |
| 延度/cm | 16 | 16.5 | 97.08 | 2.92 |
| TFOT 后延度/cm | 8.8 | 9.0 | 97.73 | 2.27 |
| 软化点/℃ | 78.9 | 78.3 | 99.29 | 0.71 |
| TFOT 后软化点/℃ | 82.6 | 81.6 | 98.79 | 1.21 |

4 LKB-S 沥青的性能分析

4.1 再生沥青调和理论模型介绍

再生沥青调和模型是一种用于评估老化沥青再生后性能的理论模型^[23],该模型具备预测再生沥青道路性能的能力,为再生沥青在道路工程中的运用提供了理论基础。依据再生沥青调和理论,不同基质沥青混合比例下的再生沥青在针入度、高温稳定

性、黏度和延度等关键性能指标上均与调和理论的预测相吻合,表明该理论适用于预测再生沥青的基础性能^[24]。

通过再生沥青调和理论可得到两相液体混溶的黏度模型^[25],该模型可用式(7)表示:

$$\ln \eta = v_1 \ln \eta_1 + v_2 \ln \eta_2 \tag{7}$$

其中: v_1 、 v_2 分别为两种液体的体积比例; η_1 、 η_2 、 η 分别为两种液体及混溶后液体的黏度。

针入度能够表征沥青条件黏度,再生沥青针入度 P_{mix} 、老化沥青针入度 P_1 与新沥青针入度 P_2 之间的关系,可用式(8)表示:

$$\lg P_{\text{mix}} = (1 - \alpha) \lg P_1 + \alpha \lg P_2 \quad (8)$$

其中: α 为新沥青质量占再生沥青总质量的百分比。

根据国内外学者的研究结果^[26-27],沥青的针入度 P 与软化点 T_{RB} 之间存在的关系可用式(9)表示:

$$T_{\text{RB}} = \frac{145}{P^{0.243}} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8),可得到再生沥青软化点 T_{mix} 、老化沥青软化点 T_1 与新沥青软化点 T_2 之间的关系,可用式(10)表示为:

$$T_{\text{mix}} = (1 - \alpha) T_1 + \alpha T_2 \quad (10)$$

基于上述分析,设置 LKB 沥青含量(LKB 沥青与 LKB 沥青和老化沥青混溶后的沥青的质量比)分别为 0%、10%、20%、30%、40%和 50%配置 LKB-S 沥青样品进行试验。

4.2 试验结果分析

4.2.1 针入度试验分析

对不同 LKB 沥青质量百分比下 LKB-S 沥青针入度的试验结果与模型预测数据进行对比,如图 4 所示。由图 4 可知,试验结果与模型预测趋势基本一致,表明再生沥青针入度符合理论模型规律,也表明再生沥青调和理论模型可应用于再生沥青的针入度预测。

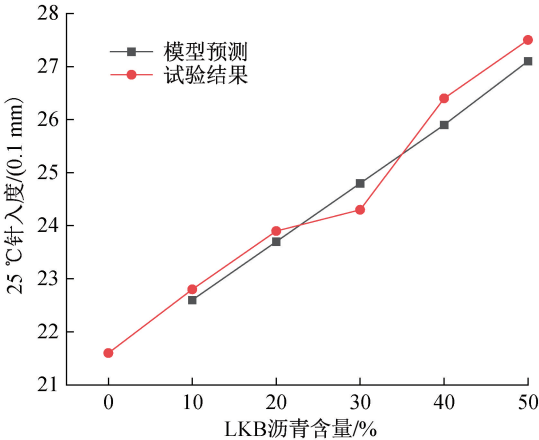


图 4 针入度试验结果与模型预测折线图

对不同 LKB 沥青质量百分比的 LKB-S 沥青的老化前和 TFOT 老化后的针入度进行测定并计算其残留针入度比,测试结果绘制如图 5 所示。其中残留针入度比计算公式可用式(11)表示:

$$R_p = \frac{P}{P_0} \quad (11)$$

其中: R_p 为残留针入度比, P_0 为沥青老化前的针入度, P 为沥青老化后的针入度。

由图 5 可知,LKB 沥青掺入老化沥青可以提高沥青的针入度,表明 LKB 沥青的掺入可以改善老化沥青的老化性能;且在含量为 30%时,沥青残留针入度比达到最大值,表明在含量为 30%时对老化沥青的老化性能的改良效果最佳。

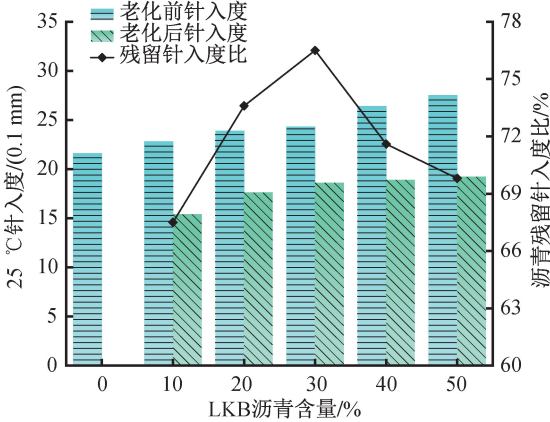


图 5 针入度与 LKB 沥青含量柱线图

4.2.2 软化点试验分析

对不同 LKB 沥青质量百分比下 LKB-S 沥青软化点的模型预测数据与试验结果进行对比,如图 6 所示。由图 6 可知,试验结果与模型预测趋势基本一致,表明再生沥青软化点试验符合理论模型规律,也表明再生沥青调和理论模型可应用于再生沥青的软化点预测。

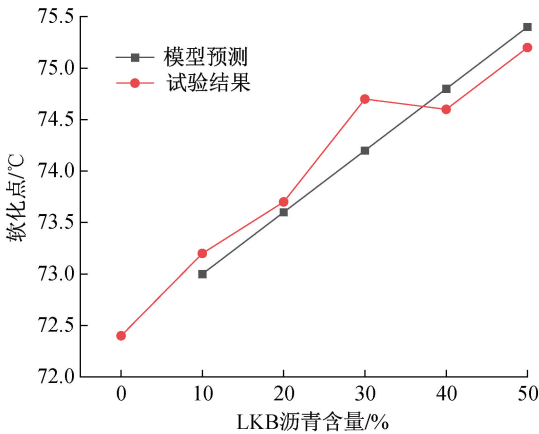


图 6 软化点试验结果与模型预测对比折线图

对不同 LKB 沥青质量百分比的 LKB-S 沥青的老化前和 TFOT 老化后的软化点进行测定并计算其软化点增量,测试结果绘制如图 7 所示。其中软化点增量的计算公式,可用式(12)表示为:

$$\Delta T = T_a - T_0 \quad (12)$$

其中: ΔT 为软化点增量, T_a 为老化后沥青的软化

点, T_0 为老化前沥青的软化点。

由图 7 可以发现, LKB-S 沥青的软化点随着 LKB 沥青含量的增加而提高; 并且可以发现, 当 LKB 沥青含量为 30% 时, 软化点增量最小, 表明沥青受到老化的影响最小, 因此 LKB 沥青的添加能够提高老化沥青的老化性能。然而, 当 LKB 沥青的比例达到 40% 时, 观察到沥青的软化点有所下降。这可能是因为 SBS 改性沥青具有独特空间网络结构, 当 LKB 沥青含量过多时, 会显著改变老化沥青的胶体结构, 导致数据出现不稳定现象。

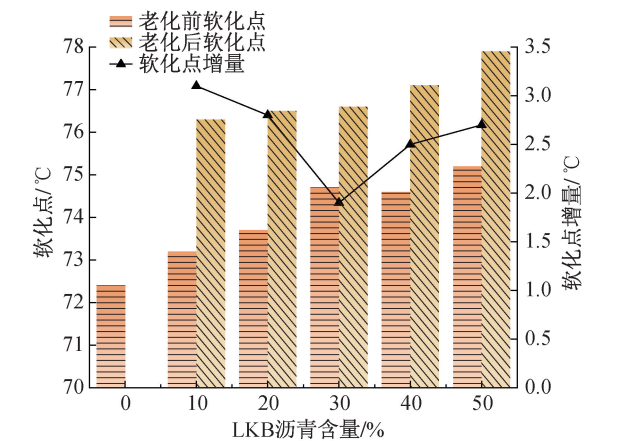


图 7 软化点与 LKB 沥青含量柱线图

4.2.3 延度试验分析

对不同老化沥青含量的 LKB-S 沥青的老化前和 TFOT 老化后的延度进行测量并计算其延度保留率, 测试结果绘制如图 8 所示。延度保留率计算公式可用式(13)表示:

$$R_D/\% = \frac{D}{D_0} \times 100 \tag{13}$$

其中: R_D 为延度保留率, D 为老化后沥青延度, D_0 为老化前的沥青延度。

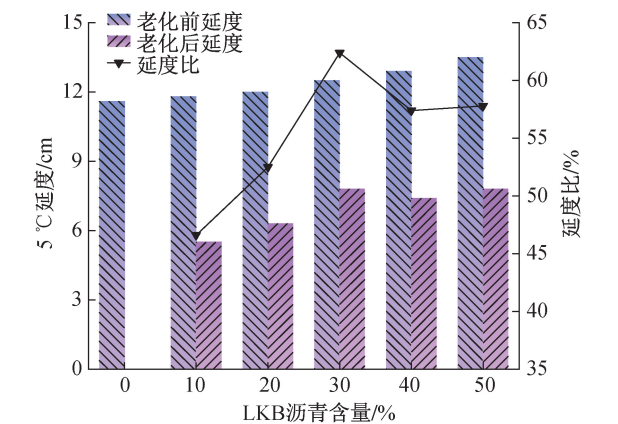


图 8 延度与 LKB 沥青含量柱线图

由图 8 可以看出: 在低温延度方面, 再生沥青的延度比在 LKB 沥青含量为 30% 时达到最大值, 表明在 LKB 沥青掺量为 30% 时, 再生沥青老化后抗低温性能最佳; 再生沥青的延度在老化沥青的基础上有所恢复, 但并没有达到路用要求, 这表明单纯通过 LKB 沥青改善老化沥青的延度效果并不能满足路用要求, 需要通过其他的改性剂去改良沥青的低温性能。

5 结 论

为提高老化沥青的利用效率, 本文提出了一种岩抗 SBS 复合再生沥青的制备方法。首先通过岩沥青和抗剥落剂复掺改性 SBS 沥青, 采用响应曲面法得到二者最佳掺量, 制备 LKB 沥青; 然后将 LKB 沥青与老化沥青掺和, 并采用再生沥青调和理论模型得到 LKB 沥青的最优含量, 从而制备出 LKB-S 沥青。主要结论如下:

- a) 岩沥青能够提高沥青的抗老化和抗高温性能, 但是会削弱沥青的耐低温性能; 抗剥落剂在提高沥青抗老化和抗高温性能的同时能够提升老化沥青的低温延展性。
- b) 采用响应曲面法确定了 LKB 沥青中岩沥青和抗剥落剂的最优掺量, 分别为 8.5% 和 0.4%。
- c) LKB 沥青可以恢复老化沥青的耐老化性能; 在 LKB 沥青含量为 30% 时对老化沥青的性能提升作用最显著, 残留针入度比达最大值(76.5%), 软化点增量为最小值(1.9℃), 延度比达最大值(62.4%)。
- d) LKB-S 沥青的针入度和软化点符合理论模型规律, 该制备方法下再生沥青的性能可通过再生沥青调和理论模型进行预测。

本文提出的复合再生沥青的制备方法, 通过结合岩沥青和抗剥落剂对 SBS 改性沥青进行改性处理, 显著增强了回收沥青中老化沥青的耐老化能力和高温稳定性。此外, 本文利用响应曲面法精确确定了改性剂的最佳掺配比例, 提升了材料使用效率和经济效益。本文可为老化沥青的资源化利用及再生沥青的制备提供新的思路。

参考文献:

[1] 王修山, 王铭杰, 徐靖怡, 等. 岩沥青/环氧树脂复合改性路面回收料路用性能[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13): 5395-5402.

[2] Hamed G H, Esmaeeli M R, Gilani V N M, et al. The effect of

aggregate-forming minerals on thermodynamic parameters using surface free energy concept and its relationship with the moisture susceptibility of asphalt mixtures [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 8818681.

[3] Moretti L, Palozza L, D’Andrea A. Causes of asphalt pavement blistering: A review[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(5): 2189.

[4] 王智超, 胡槟, 沈明燕, 等. 基于路用性能的热再生沥青混合料 RAP 掺量研究[J]. *公路交通科技*, 2024, 41(1): 10-17.

[5] 左锋, 叶奋, 宋卿卿. RAP 掺量对再生沥青混合料路用性能影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(4): 1403-1410.

[6] 田小草, 姚世林, 卢雪蓉, 等. 基于菲克第二定律的再生沥青中新旧沥青扩散融合研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(11): 21-27.

[7] Li F J, Wang Y H. Use of accelerated natural aging to simulate long-term asphalt binder aging in pavements[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2024, 2678(2): 266-278.

[8] 原广晨. 基于自然老化的 SBS 改性沥青梯度行为研究及加速老化对比分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021: 69.

[9] Lapien F E P, Ramli M I, Pasra M, et al. The performance modeling of modified asbuton and polyethylene terephthalate (PET) mixture using response surface methodology (RSM)[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(13): 6144.

[10] Gong Y F, Song J X, Bi H P, et al. Optimization design of the mix ratio of a nano-TiO₂/CaCO₃-basalt fiber composite modified asphalt mixture based on response surface methodology[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(13): 4596.

[11] Wang W S, Cheng Y C, Tan G J. Design optimization of SBS-modified asphalt mixture reinforced with eco-friendly basalt fiber based on response surface methodology[J]. *Materials*, 2018, 11(8): 1311.

[12] Fan T T, Si C D, Zhang Y, et al. Optimization design of asphalt mixture composite reinforced with calcium sulfate anhydrous whisker and polyester fiber based on response surface methodology[J]. *Materials*, 2023, 16(2): 594.

[13] Cheng P F, Wang C, Zhang K Y, et al. Study on design and pavement performance of rice straw fiber asphalt mixture based on response surface methodology[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2024, 17(4): 967-981.

[14] 马峰, 姜欣野, 傅珍, 等. 基于响应曲面法的 TiO₂/ZnO/BF 改性沥青混合料性能分析[J]. *应用化工*, 2023, 52(7): 1968-1973.

[15] 白中良, 李萍, 王晖, 等. 基于响应曲面法的沥青再生剂配比设计以及抗老化研究[J/OL]. *化工进展*, 2024: 1-14. (2024-04-24) [2025-03-28]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0398>.

[16] 王丽丽, 卓上智, 梁忠善, 等. 响应面法优化大比例厂拌热再生混合料参数[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(4): 1691-1697.

[17] 黄刚, 贺俊玺, 张霞, 等. 岩沥青与 SBS 复合改性高黏沥青的配比研究[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(3): 31-44.

[18] 王联芳, 孙立军, 吕泉. 岩沥青胶粉复合改性高模量沥青性能研究[J]. *公路交通科技*, 2024, 41(2): 1-10.

[19] 申爱琴, 王建文, 郭寅川, 等. 抗剥落剂对沥青老化性能影响研究[J]. *公路*, 2019, 64(8): 201-207.

[20] 朱建勇, 何兆益. 抗剥落剂与沥青相容性的分子动力学研究[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(1): 34-40.

[21] 储田, 邵艳. 基于 Box-Behnken 法的合肥滨湖软土固化配比的试验研究[J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(4): 305-311.

[22] 朱广河. 内蒙古岩沥青/SBS 复合改性沥青防水卷材的制备及性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(6): 149-152.

[23] 田小草, 卢雪蓉, 窦文利, 等. 再生沥青调和理论的适用性研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(1): 20-26.

[24] Liu Q, Wu J, Oeser M. Micro- and Meso-scale homogeneity of asphalt mixtures with RAP in thermal-non-equilibrium condition[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 304: 124609.

[25] 邱欣, 陈舒琪, 项震宇, 等. 新旧沥青混融行为机制分析及融合程度量化表征[J]. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 47(2): 133-142.

[26] Shi X, Si C, Yan K, et al. Research on the low-temperature performance of basalt fiber- rubber powder modified asphalt mixtures under freeze-thaw in large temperature differences region[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 30580.

[27] Refaat A, Saleh A M, Farag R K, et al. Developing recycled asphalt binder using ecofriendly bio additives[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2025, 10: 37.

团队介绍

王修山教授团队专注于道路材料的研发、细观力学研究和道路结构仿真分析。近年来,团队承担了多项国家级和省级科研项目,发表了 80 余篇学术论文,其中 SCI 和 EI 检索论文近 40 篇,出版了多部教材和专著,推动了道路工程材料领域的进步。

团队带头人王修山教授在沥青混凝土材料研发领域有着较为深厚的学术积累和一定的学术影响力,主持了多项科研项目,发表了多篇高影响力的学术论文。他的研究方向包括多尺度复合材料改性沥青、温拌沥青混合料技术等,近期在 3D 人工智能颗粒技术和沥青混合料压实行行为表征方面取得了重要进展。团队其他主要成员李震南博士,专注于沥青混合料微观力学行为研究。

(责任编辑:康 锋)