

# 温拌再生沥青路面层间抗剪特性研究

王超

陕西省交通规划设计研究院有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2024年5月30日; 录用日期: 2024年6月19日; 发布日期: 2024年6月27日

## 摘要

温拌沥青技术是指在较低的温度下生产、铺设和压实沥青混合料, 比传统的热拌沥青低约40°C, 能源消耗减少, 且温拌沥青的回收沥青料比例要高于热拌沥青。关于温拌沥青的一个主要问题是拌合摊铺过程中的工作温度降低可能会导致路面结构层间的附着力不足, 本文通过实际工程取芯, 测试芯样在不同界面(上面层-中面层、中面层-下面层)的层间抗剪强度, 分析了采用不同种类温拌添加剂的温拌再生沥青路面和热拌再生沥青路面的层间抗剪性能。结果显示, 温拌沥青路面的层间抗剪性能与热拌沥青路面相当, 并且受温拌添加剂类型的影响较小。此外, 层间抗剪强度受层间黏结剂的影响较大, 特别是上面层和中面层的抗剪强度。

## 关键词

温拌再生沥青路面, 热拌再生沥青路面, 抗剪特性, 层间抗剪强度

# Study on Interlayer Shear Resistance Characteristics of Warm Mix Recycled Asphalt Pavement

Chao Wang

Shaanxi Provincial Transport Planning Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: May 30<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 27<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Warm mix asphalt technology refers to the production, laying and compaction of asphalt mixture at a lower temperature, about 40°C lower than traditional hot mix asphalt, energy consumption is reduced, and warm mix asphalt recovery ratio is higher than hot mix asphalt. One of the main problems of warm mixed asphalt is that the decrease of working temperature during the mixing

paving process may lead to insufficient adhesion between pavement layers. In this paper, the interlayer shear strength of core samples at different interfaces (upper layer-middle layer, middle layer-lower layer) and time intervals is tested by experiments. The interlayer bonding properties of warm mix recycled asphalt pavement and hot mix asphalt pavement with different kinds of warm mix agents were analyzed. The results show that the interlayer bonding performance of the warm asphalt pavement is similar to that of the hot asphalt pavement, and is not affected by the type of warm mixing agent. In addition, the interlayer shear strength depends on the properties of the interlayer binder, especially the shear strength of the upper layer and the middle layer.

## Keywords

Warm Mix Recycled Asphalt Pavement, Hot Mix Recycled Asphalt Pavement, Shear Resistance Characteristics, Interlayer Shear Strength

Copyright © 2024 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

近年来,随着可持续发展意识的深入人心,人们对温拌沥青技术产生了极大兴趣,相比于传统的热拌沥青,其生产过程温度较低,通常在 120°C 到 140°C 之间,能源消耗显著减少。低温生产过程减少了温室气体的排放,温拌沥青技术的应用实现了更低的碳排放和烟雾污染,降低了对环境的影响和工人的健康风险。同时,由于温度降低,对沥青老化损伤减少,更有利于旧路面再生沥青的回收利用,符合“双碳”战略和循环经济的要求。

众所周知,良好的层间黏结对于交通荷载引起的剪应力在道路结构内的传递是非常重要的。温拌沥青由于拌合温度较低,可能会导致路面各结构层之间的黏结效果变差,从而对路面结构整体性产生负面影响。这种不确定性是阻碍温拌沥青推广应用的重要问题之一。

目前,国内外学者对温拌沥青路面的层间黏结特性展开了一系列研究[1]-[24],从再生沥青的添加比例、温拌添加剂、材料老化、集料的颗粒形状、旧路表面处理方式等多个角度对层间抗剪强度的影响规律进行了总结,研究方法以室内试验与有限元模型数值分析为主,且在研究结论上尚未达成一致。

基于此背景,本文以温拌再生沥青路面实际工程为依托,研究了几种使用不同温拌添加剂的再生沥青路面的层间黏结性能,并分析了不同黏层油、服役时长、沥青混合料配合比等因素对层间抗剪性能的影响,为温拌再生沥青路面的推广应用提供参考。

## 2. 实验方法及材料

### 2.1. 工程概况

试验路 1 于 2017 年 4 月份修筑,旧路面所有面层结构均进行破除重建,分别在四段试验段上进行取芯并进行抗剪强度试验,前后分两次进行试验,第一次试验时间为 2017 年 4 月,第二次试验时间为 2020 年 5 月。这四段分别为热拌、温拌添加 C1、C2、C3 作为添加剂,编号为热-1,温 C1-1,温 C2-1,温 C3-1。道路结构均相同:4 cm OGFC(含 15% RA)+6 cm 中面层(含 25% RA)+8 cm 下面层(含 30% RA)。新沥青和再生沥青 RA 均为 SBS 改性沥青,在上面层和中面层层间洒布 0.6 kg/m<sup>2</sup> 的热 SBS 沥青作为黏层油。在温 C1-1,温 C2-1,温 C3-1 中,添加剂 C1 为胺类添加剂,为表面活性剂和黏附增强剂;添加剂

C2 为烷基酸盐和脂肪酸，为黏性调节剂；添加剂 C3 为表面活性剂。热拌沥青混合料的生产温度和压实温度分别为 170℃ 和 160℃，温拌沥青混合料的生产温度和压实温度分别为 130℃ 和 120℃。

试验路 2 的施工时间为 2016 年 10 月，对旧路的上面层和中面层进行破除重建。试验段分为三段，分别为热拌、温拌添加 C1 和 C2 添加剂，编号热-2，温 C1-2，温 C2-2，每个试验段分为两个子段，用来对比研究不同黏层油对层间抗剪强度的影响。在其中一个子段上，在上中面层层间、中下面层层间，使用 0.3 kg/m<sup>2</sup> 阳离子乳化沥青作为黏层油，在对比子段上，上中面层间使用 0.5 kg/m<sup>2</sup> 的热 SBS 沥青作为黏层油，中下面层间未进行黏层油处理。道路结构为：4 cm OGFC (含 15% RA) + 8 cm 中面层(含 25% RA)，温拌沥青添加剂(C1 和 C2)、OGFC 等配比设计以及热拌沥青和温拌沥青采用的温度等条件均与试验路 1 相同。

试验路 3 的施工时间为 2020 年 7 月，对既有路面的中上面层进行破除新建。试验段分为两段，分别为热拌和温拌，编号为热-3 和温-3，其中热-3 段结构为 4 cm SMA (含 15% RA) + 6 cm 中面层(含 20% RA)，温-3 段温拌添加剂为 C1，结构为 4 cm SMA (含 25% RA) + 6 cm 中面层(含 30% RA)。温拌沥青添加剂 C1 及热拌沥青和温拌沥青采用的温度等条件均与试验路 1 相同，在上中面层界面处未进行涂层处理。

本文所研究试验路的主要信息如表 1 所示。

**Table 1.** Main information on the field trials

**表 1.** 试验路主要信息

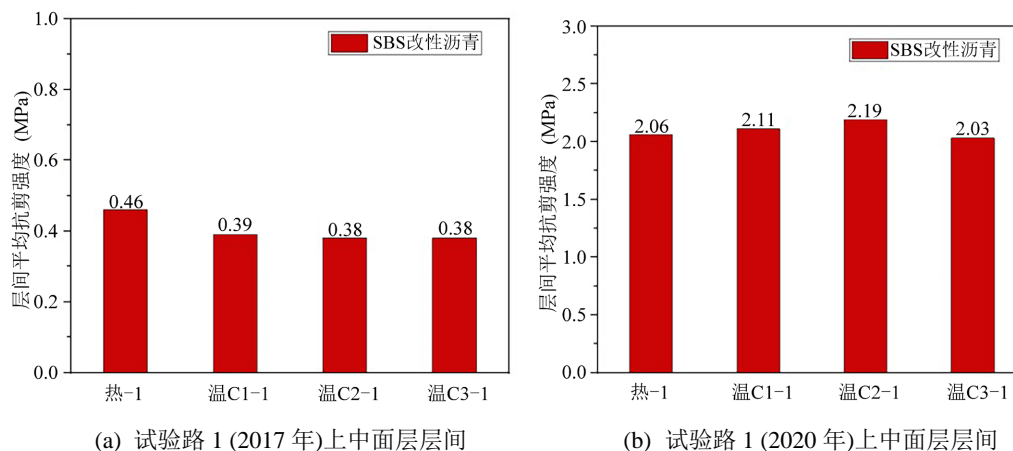
序号	修建时间	断面	结构(再生沥青 RA 含量)
1	2017.04	热-1, 温 C1-1, 温 C2-1, 温 C3-1	上面层(15% RA), 中面层(25% RA), 下面层(30% RA)
2	2016.10	热-2, 温 C1-2, 温 C2-2	上面层(15% RA), 中面层(25% RA)
3	2020.07	热-3, 温-3	上面层(15%/25% RA), 中面层(20%/30% RA)

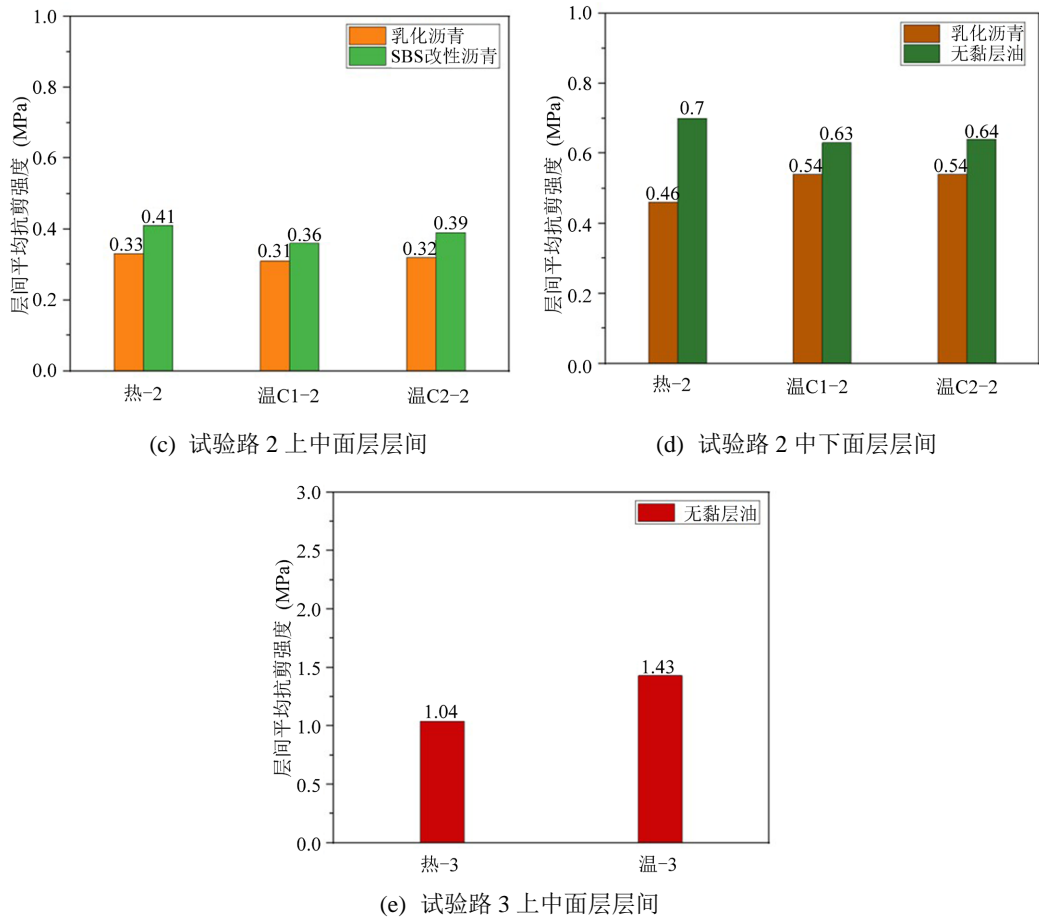
## 2.2. 测试方法

本文所有芯样均为铺完上面层后钻芯，直径为 10 cm，钻孔深度比待检测位置深 0.5~1 cm。层间抗剪强度测试方法分为斜剪试验，斜剪试验的垂向位移速率为 50 mm/min，层间界面与垂直方向的角度为 45°。试验温度均为 20℃，层间剪切强度计算为最大剪切力与层间接触面积之比。根据试验结果评价温拌添加剂、道路服役时长、黏层油等因素对层间抗剪强度的影响。

## 3. 结果及分析

### 3.1. 层间抗剪强度





**Figure 1.** Average interlayer shear strength  
**图 1.** 层间平均抗剪强度

在具体试验过程中，不同的位移率测试条件测得的层间抗剪强度值不同，为了能够统一标准，均采用 2.2 节测试方法中测试条件所得结果进行分析，层间抗剪强度平均值如图 1 所示。

### 3.2. 温拌沥青技术与热拌沥青技术对比

温拌沥青技术和热拌沥青技术在试验路 1 和 2 的层间抗剪强度方差分析结果如表 2 和表 3 所示，可以看到，热拌沥青技术和温拌沥青技术测试所得的平均抗剪强度值接近，其差异无统计学意义( $p$  值远高于 0.05)。

2017 年在试验路 1 的试验结果中，热-1 和温 C2-1 的差异具有统计学意义，热-1 和温 C1-1、热-1 和温 C3-1 的  $p$  值接近 0.05。从图 1 中可以看出，温 C1-1、温 C2-1、温 C3-1 三组温拌沥青芯样的层间平均抗剪强度值均在 0.38~0.39 MPa，热-1 芯样的层间平均抗剪强度为 0.46 MPa，相差 0.07~0.08 MPa。

试验路 2 的试验结果与试验路 1 类似，热-2 与温 C1-2、热-2 与温 C2-2 的  $p$  值略大于 0.05，热-2 的上中面层层间平均抗剪强度为 0.41 MPa，温 C1-2 的上中面层层间平均抗剪强度为 0.36 MPa。

试验路 2 的中下面层层间平均抗剪强度对比时发现，温拌沥青技术的测试结果优于热拌沥青技术，试验路 3 的测试结果也是如此，温-3 的层间平均抗剪强度为 1.43 MPa，显著高于热-3 的层间平均抗剪强度 1.04 MPa。

总体看来，温拌沥青技术对路面的层间抗剪强度不会产生不利影响，其抗剪强度与热拌沥青技术路

面的层间抗剪强度相当。

**Table 2.** Analysis of shear strength between layers of WMA and HMA (Field trial 1, Upper and middle surface layers)

**表 2.** 温拌沥青与热拌沥青层间抗剪强度差异分析(试验路 1, 上中面层层间)

断面	2017 年		2020 年	
	p	显著性	p	显著性
热 1 vs 温 C1-1	0.054	N	0.790	N
热 1 vs 温 C2-1	0.020	Y	0.524	N
热 1 vs 温 C3-1	0.059	N	0.779	N

**Table 3.** Analysis of shear strength between layers of WMA and HMA (Field trial 2)

**表 3.** 温拌沥青与热拌沥青层间抗剪强度差异分析(试验路 2)

断面	上中面层				中下面层			
	乳化沥青		SBS 改性沥青		乳化沥青		SBS 改性沥青	
	p	显著性	p	显著性	p	显著性	p	显著性
热 2 vs 温 C1-2	0.522	N	0.091	N	0.216	N	0.319	N
热 2 vs 温 C2-2	0.684	N	0.319	N	0.438	N	0.326	N

### 3.3. 温拌添加剂影响分析

温拌添加剂对试验路 1 和 2 层间抗剪强度影响的方差分析结果如表 4 和表 5 所示, 其 p 值均远高于 0.05, 说明不同温拌添加剂的使用对层间抗剪强度的影响差异无统计学意义。从图 1 中可以看出, 不同温拌添加剂条件下所测得的层间平均抗剪强度非常相近, 即温拌添加剂类型对层间抗剪强度没有显著影响。

**Table 4.** Analysis of the shear strength with different warm-mix additives (Field trial 1, Upper and middle surface layers)

**表 4.** 不同温拌添加剂抗剪强度差异分析(试验路 1, 上中面层层间)

断面	2017 年		2020 年	
	p	显著性	p	显著性
温 C1-1 vs 温 C2-1	0.576	N	0.619	N
温 C1-1 vs 温 C3-1	0.781	N	0.584	N
温 C2-1 vs 温 C3-1	0.638	N	0.393	N

**Table 5.** Analysis of the shear strength with different warm-mix additives (Field trial 2)

**表 5.** 不同温拌添加剂抗剪强度差异分析(试验路 2)

断面	上中面层				中下面层			
	乳化沥青		SBS 改性沥青		乳化沥青		SBS 改性沥青	
	p	显著性	p	显著性	p	显著性	p	显著性
温 C1-2 vs 温 C2-2	0.730	N	0.251	N	0.982	N	0.743	N

### 3.4. 公路服役时长的影响

从试验路 1 的两次试验结果可以看到, 2017 年的层间平均抗剪强度在热拌沥青技术条件下为 0.46

MPa，而温拌沥青技术条件下为 0.38~0.39 MPa。2020 年无论是热拌还是温拌，层间平均抗剪强度均高于 2.0 MPa，表明在三年的服役期内，热拌沥青技术和温拌沥青技术的层间抗剪强度均增加了约 4 倍。

这种层间抗剪强度增加现象可能是由于在高温条件时，沥青的流变特性增加，在交通荷载作用下，结构层间沥青及集料颗粒的空间构型和相对位置发生重组融合，增强了路面结构的整体性，结构层间黏聚力与重组前相比是增加的。

### 3.5. 黏层油的影响

不同黏层油对层间抗剪性能影响的方差分析结果如表 6 所示。

**Table 6.** Analysis of the shear strength with different tack coats (Field trial 2)

**表 6.** 不同黏层油抗剪强度差异分析(试验路 2)

结构层	黏层油	热-2		温 C1-2		温 C2-2	
		p	显著性	p	显著性	p	显著性
上中面层层间	乳化沥青 vs SBS 改性沥青	0.052	Y	0.124	N	0.020	Y
中下面层层间	乳化沥青 vs 无	0.021	Y	0.159	N	0.341	N

在试验路 2 的上中面层层间，采用 SBS 改性沥青作为黏层油时的层间平均抗剪强度均高于乳化沥青，这是因为黏层油采用的 SBS 改性沥青与上面层和中面层的 SBS 改性沥青有较好的亲和性。表中热-2 和温 C2-2 的层间抗剪强度差异具有统计学意义，p 值小于 0.05，也说明了 SBS 改性沥青和乳化沥青作为黏层油时的层间抗剪强度存在显著差异。

对于中下面层层间抗剪强度而言，未涂抹黏层油的层间平均抗剪强度均高于有乳化沥青。这种现象的原因可能是乳化沥青具有润滑作用，一定程度上降低了沥青层骨料之间的摩擦作用，导致抗剪强度降低。

综上所述，黏层油对层间抗剪强度的影响较大，在实际工程应用中应根据具体情况选择最合适的黏层油。

### 3.6. 沥青混合料配合比的影响

对比试验路 1、2 和试验路 3，当上面层为 OGFC 时，热拌沥青和温拌沥青段的上中面层层间平均抗剪强度均低于 0.50 MPa，而当上面层为 SMA 致密层的情况下，热拌沥青和温拌沥青的上中面层层间平均抗剪强度均高于 1.00 MPa。此外，在试验路 2 中，同样采用乳化沥青作为黏层油的中下面层层间平均抗剪强度要高于上中面层约 1/3。这些现象的原因可能是 OGFC 在层间界面上是有较高孔隙率的、不连续的，与邻层结构的接触点少于致密结构。

## 4. 结语

本文通过对采用热拌沥青和温拌沥青技术的 3 条试验路的层间抗剪强度进行了对比分析，探究了热拌和温拌技术、温拌添加剂、道路服役时长、黏层油、沥青混合料配合比等因素对层间抗剪强度的影响，得到的结论如下：

- (1) 温拌沥青技术不会对路面的层间抗剪强度产生不利影响，其抗剪强度与热拌沥青技术路面的层间抗剪强度相当。
- (2) 温拌沥青添加剂类型不影响路面层间的抗剪性能。
- (3) 路面层间抗剪性能受黏层油的影响较大，实际工程中应根据具体情况选择合适的黏层油材料。

(4) 由于结构层界面处的沥青和集料颗粒的空间构型和相对位置和在高温和荷载共同作用下发生重组融合, 层间抗剪强度在道路服役前几年时间里会随时间推移而增加。

(5) 密级配结构层间的抗剪强度高于开级配结构层间, 在开级配结构层作为上面层的道路结构中, 应重点关注其对层间抗剪强度的不利影响。

本文研究成果为温拌再生沥青路面技术的推广和应用提供参考。

## 参考文献

- [1] 李达. 旧料掺量对温拌再生沥青混合料耐久性的影响分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 25-31, 48.
- [2] 梁波, 张海涛, 梁缘, 王晓锋, 郑健龙. 温拌沥青技术研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 24-46.
- [3] 蔡海泉. 泡沫温拌沥青混合料在养护工程中的应用及环境影响研究[J]. 公路, 2024(5): 447-451.
- [4] 黄昭东, 何兆益, 余乐, 胡茂密. 基于植物沥青的温拌再生沥青流变及疲劳性能研究[J]. 应用化工, 2023, 52(3): 713-717.
- [5] 李强, 陆杨, 王家庆, 孙光旭, 赵曜. 温拌再生沥青胶结料二次老化性能[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 102-116.
- [6] 黄毅, 郑炳锋. 泡沫温拌再生沥青混合料回弹模量与动态模量的试验研究[J]. 公路, 2023, 68(1): 30-38.
- [7] 余晖, 郑炳锋, 黄毅, 朱富万. 泡沫温拌再生沥青混合料力学性能研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 277-281.
- [8] 李强, 孙光旭, 罗桑, 周洲, 孟元鹏. 二次老化条件下温拌再生沥青胶结料的抗车辙和低温性能评价[J]. 东南大学学报(英文版), 2020, 36(1): 81-87.
- [9] 王正勇. 温拌再生沥青路面水损坏研究[J]. 价值工程, 2023, 42(20): 145-148.
- [10] 张风雪, 许斌, 高奥东. 100%温拌再生沥青混合料性能评价[J]. 中国公路, 2023, 624(14): 109-111.
- [11] 王火明, 姚森, 张跃, 宋兴华, 曾祥倩. 热拌及温拌再生沥青混合料疲劳特性研究[J]. 公路交通技术, 2023, 39(2): 39-44.
- [12] 王志杰, 付其林, 黄亮, 魏建国, 王力扬. 废机油再生剂对温拌再生沥青混合料性能影响研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 184-191.
- [13] 周刚, 王庆, 孙潜, 刘秘强. 聚酯纤维温拌再生沥青混合料性能及压实温度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 55-60.
- [14] 巍, 赵永伟, 龙琰, 张二杰, 姜志强. 不同旧料掺量下温拌再生沥青混合料的耐久性[J]. 合成纤维, 2023, 52(10): 62-65, 70.
- [15] 程英伟, 宋崇惠, 彭蕾. 温拌再生沥青混合料的拌和成型工艺研究[J]. 公路, 2019, 64(7): 41-45.
- [16] 哈密提, 胡雅群, 许子凯. 纤维增强温拌再生沥青混合料路用性能研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2022(5): 1-3, 9.
- [17] 安王聪, 刘芳, 丛林. RAP 掺量对温拌再生沥青混合料性能的影响综述[J]. 华东公路, 2023(3): 36-39.
- [18] 王志祥, 张争奇. 软-硬复配温拌再生沥青混合料机理及性能[J]. 公路, 2019, 64(2): 49-54.
- [19] 雷俊安, 郑南翔, 许新权, 吴传海, 吕大伟. 温拌沥青高温流变性能研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 904-911.
- [20] 王春, 张喜艳, 郝培文. 温拌沥青混合料水稳定性能改善措施[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 912-920.
- [21] 于延忠, 李冬娜, 高宏刚, 颜鲁春, 张斌. 紫外线对温拌沥青混合料粘附性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(6): 982-986, 1007.
- [22] 何兆益, 蒋斌, 谭洋伟, 孔林, 李家琪. 不同增塑剂对 Sasobit 温拌沥青性能的影响[J]. 应用化工, 2022, 51(1): 39-42.
- [23] 宋云连, 高盼, 吕鹏. 温拌沥青低温性能及其微观特性机理研究[J]. 材料导报, 2021, 35(z1): 251-257.
- [24] 史绍松, 李传强, 凌天清, 刘书彬, 杨清尘. 不同熔点的废旧 PE 裂解蜡温拌沥青性能研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(10): 275-280, 285.