

文章编号:1007-9629(2025)04-0340-10

# 仿生物基温拌再生沥青混合料路用性能影响因素

杨彦海\*, 孙溢, 金鑫, 杨野

(沈阳建筑大学 交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要:**通过正交试验设计,优化了仿生物基温拌再生沥青混合料的空隙率、高低温性能及水稳定性,得到最佳组合参数.同时,采用傅里叶红外光谱(FTIR)技术,分析了仿生物基温拌再生剂对老化苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青的作用机理.结果表明:在试件击实成型温度为130℃、沥青混合料回收料(RAP)掺量为50%且仿生物基温拌再生剂掺量为4.5%条件下,温拌再生沥青混合料的性能达到最优;掺入4.5%仿生物基温拌再生剂能够有效恢复老化SBS改性沥青的官能团结构,这进一步验证了仿生物基温拌再生沥青混合料宏观性能优化的准确性.

**关键词:**道路工程;温拌再生沥青混合料;仿生物基温拌再生剂;路用性能

中图分类号:U418

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.04.007

## Influencing Factors of Road Performance of Bio-inspired Warm Mix Recycled Asphalt Mixture

YANG Yanhai\*, SUN Yi, JIN Xin, YANG Ye

(School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** Through orthogonal experimental design, the air void, high and low temperature performance, and water stability of bio-inspired warm mix recycled asphalt mixture were optimized, yielding the optimal combination of parameters. Concurrently, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) technology was utilized to conduct analysis of the mechanism by which the bio-inspired warm mix rejuvenator affects the aged styrene-butadiene-styrene (SBS) modified asphalt. The results indicate that the performance of the warm mix recycled asphalt mixture is optimized under conditions of a specimen compaction temperature of 130 °C, a reclaimed asphalt pavement (RAP) content of 50%, and a bio-inspired warm mix rejuvenator content of 4.5%. The incorporation of 4.5% bio-inspired warm mix rejuvenator can effectively restore the functional group structure of aged SBS modified asphalt, further validating the accuracy of the macroscopic performance optimization of the bio-inspired warm mix recycled asphalt mixture.

**Key words:** road engineering; warm mix recycled asphalt mixture; bio-inspired warm mix rejuvenator; pavement performance

近年来,道路的维修养护已经成为公路网建设的主要任务<sup>[1]</sup>.厂拌热再生技术在实际工程应用中对沥青混合料回收料(RAP)的利用率普遍低于30%<sup>[2]</sup>.温拌再生技术作为结合温拌沥青技术与厂拌热再生技术优势的融合产物,不但能够有效减缓RAP中旧沥青

的二次老化过程,提升RAP的掺配比例,还能显著减少有害气体排放,实现低碳环保的目标<sup>[3-6]</sup>.研究表明,相较厂拌热再生沥青混合料,温拌再生沥青混合料(WRAM)的高温性能虽略逊一筹,但在低温性能和水稳定性方面表现更佳<sup>[7-8]</sup>.刘唐志等<sup>[9-10]</sup>认为,随着

收稿日期:2024-05-07;修订日期:2024-07-18

基金项目:沈阳市科技计划项目(22-322-22);国家自然科学基金资助项目(52278454);辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220922)

第一作者(通讯作者):杨彦海(1972—),男,黑龙江兰西人,沈阳建筑大学教授,博士生导师,博士.E-mail:yangyanhai168@126.com

RAP 掺量的增加,再生沥青混合料的冻融劈裂强度比及残留稳定度呈先增后减趋势,而其空隙率持续增大。

当前,温拌再生技术主要通过分批添加再生剂与温拌剂来实现,在实体工程中不仅生产工艺复杂且难以精确控制。加之RAP本身存在较大的变异性,导致混合料性能不够稳定,进而限制了该技术的发展与应用。当前国内外对于采用温拌再生一体化添加剂的温拌再生沥青混合料性能研究,特别是在综合考量多种因素对温拌再生混合料路用性能影响及深入揭示温拌再生剂作用机理方面,尚属少见。

鉴于此,本文采用正交试验,确定了最优的因素水平组合,并从微观层面阐释了仿生物基温拌再生剂的再生机理。以期在保证路用性能符合规范要求的同时,实现“高RAP掺量、高品质和高层位”使用要求,进而提升固废资源循环利用率,促进节能减排,推动绿色交通的持续发展。

## 1 试验

### 1.1 原材料

为结合实际工程应用,原材料均来源于丹东市丹霍线修复养护工程。

#### 1.1.1 集料和矿粉

仿生物基温拌再生沥青混合料(以下简称再生沥青混合料)级配为AC-13.新集料粒径范围为0~5、5~10、10~15 mm;旧集料在拌合站被精细化破碎,粒径范围为0~5、5~10、10~20 mm.矿粉为碱性优质石灰石粉.集料和矿粉的各项性能指标均符合规范要求。

#### 1.1.2 仿生物基温拌再生剂

试验用仿生物基温拌再生剂为自主研发<sup>[11]</sup>,该剂融合了仿生物贻贝胶、旧沥青再生组分与增韧组分,通过合理调配,实现了温拌剂与再生剂的有效结合。其不仅能有效降低再生沥青混合料在拌制过程中的沥青黏度,进而降低拌和温度,还能通过补充轻质组分显著促进旧沥青性能的恢复,实现旧沥青的有效再生。在生产过程中,将仿生物基温拌再生剂一次性加入混合料中,能够极大简化温拌再生沥青混合料的制备工艺,有力推动温拌再生技术的普及与应用,充分展现温拌沥青道路固废循环利用集成技术的优势。

表1为仿生物贻贝胶的主要原材料。仿生物贻贝胶由A组分及B组分构成。其中A组分是一种含有邻苯二酚基团的化合物,其侧链末端为异氰酸酯基团,制备流程为:先将单体R<sub>1</sub>与甲苯-2,6-二异氰酸酯(TDI)以摩尔比1:2混合并反应2 h;随后加入1,4-丁二醇(BDO)并充分搅拌至均匀。B组分是一种聚氨酯预聚体,其末端同样为异氰酸酯基团,其制备

过程为:先将异氰酸根指数调整为0.5(即羟基与异氰酸酯摩尔比为1:2),再将聚丙烯酸丁酯(PBA)与TDI混合并反应3 h.将A组分与B组分以摩尔比1:1混合,即可制得仿生贻贝胶。

仿生物基温拌再生剂的相关性能指标见表2。

表1 仿生物贻贝胶的主要原材料  
Table 1 Main raw materials of biomimetic mussel glue

Type of raw material	Relative molecular mass( $M_r$ )
PBA	2 000.00
TDI	250.25
BDO	90.12

表2 仿生物基温拌再生剂的相关性能指标  
Table 2 Related performance indexes of bio-inspired warm mix rejuvenator

Serial number	Test item	Test result	Standard requirement
1	60 °C viscosity/( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	68	50~175
2	Flash point/°C	246	$\geq 220$
3	$w(\text{saturates})/\%$	15.6	$\leq 30$
4	$w(\text{aromatics})/\%$	61.8	
5	Viscosity ratio before and after thin film oven test	1.328	$\leq 3$
6	Mass loss rate after thin oven test/%	1.6	[-4,4]
7	15 °C density/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1.009	

#### 1.1.3 沥青

试验用沥青为SBS改性沥青。为简化制备工艺,将旧沥青含量统一设置为RAP掺量(质量分数)的40%。仿生物基温拌再生剂以内掺法掺入SBS改性沥青中,其掺量(以旧沥青质量计)为3%、4%、5%、6%和7%。需要说明的是,采用内掺法引入仿生物基温拌再生剂的过程包含以下步骤:首先,将此再生剂混入新沥青中,旨在利用其特性初步实现温拌效果;随后,该混合物进一步与旧沥青相互作用,旨在达成沥青再生的目的。SBS改性沥青的性能指标见表3。表3中试样编号MA-0%代表仿生物基温拌再生剂掺量为0%的SBS改性沥青,其余编号依此类推。由表3可知,未

表3 SBS改性沥青的性能指标  
Table 3 Performance indexes of SBS modified asphalt

Sample No.	Penetration(25 °C)/(0.1 mm)	Softening point/°C	Ductility(5 °C)/cm
MA-0%	69.0	57.0	39
MA-3%	69.1	57.0	41
MA-4%	69.5	56.3	43
MA-5%	69.6	54.9	46
MA-6%	70.3	54.5	48
MA-7%	74.0	54.0	50

掺加仿生物基温拌再生剂的原样SBS改性沥青的各项指标与其他5种掺加仿生物基温拌再生剂的SBS改性沥青相差不大,说明采用内掺法掺加仿生物基温拌再生剂对沥青常规性能影响较小.

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 基于正交试验分析再生混合料性能影响因素 针对AC-13再生沥青混合料,采用正交试验方

法分析马歇尔试件击实成型温度(因素A)、RAP掺量(因素B)和仿生物基温拌再生剂掺量(因素C)这3个因素,对再生沥青混合料空隙率(体积分数)、高低温性能和水稳定性的影响.每个因素选取5个水平进行三因素五水平正交试验设计,制备25组马歇尔试件,正交表形式为 $L_{25}(5^3)$ ,正交试验设计方案见表4.

表4 正交试验设计方案  
Table 4 Orthogonal experimental design

Test number	Compaction temperature of specimen(factor A) / $^{\circ}\text{C}$	$w(\text{RAP})$ (factor B)/%	$w(\text{bio-inspired warm mix rejuvenator})$ (factor C) /%	Test protocol
1	1(120)	1(30)	1(3)	A1B1C1
2	1(120)	2(40)	2(4)	A1B2C2
3	1(120)	3(50)	3(5)	A1B3C3
4	1(120)	4(60)	4(6)	A1B4C4
5	1(120)	5(70)	5(7)	A1B5C5
6	2(130)	1(30)	2(4)	A2B1C2
7	2(130)	2(40)	3(5)	A2B2C3
8	2(130)	3(50)	4(6)	A2B3C4
9	2(130)	4(60)	5(7)	A2B4C5
10	2(130)	5(70)	1(3)	A2B5C1
11	3(140)	1(30)	3(5)	A3B1C3
12	3(140)	2(40)	4(6)	A3B2C4
13	3(140)	3(50)	5(7)	A3B3C5
14	3(140)	4(60)	1(3)	A3B4C1
15	3(140)	5(70)	2(4)	A3B5C2
16	4(150)	1(30)	4(6)	A4B1C4
17	4(150)	2(40)	5(7)	A4B2C5
18	4(150)	3(50)	1(3)	A4B3C1
19	4(150)	4(60)	2(4)	A4B4C2
20	4(150)	5(70)	3(5)	A4B5C3
21	5(160)	1(30)	5(7)	A5B1C5
22	5(160)	2(40)	1(3)	A5B2C1
23	5(160)	3(50)	2(4)	A5B3C2
24	5(160)	4(60)	3(5)	A5B4C3
25	5(160)	5(70)	4(6)	A5B5C4

Note: Numbers in brackets represent the levels of each factor.

每组试件分别进行 $60^{\circ}\text{C}$ 单轴贯入试验、 $-10^{\circ}\text{C}$ 低温劈裂试验与冻融贯入试验,以评价再生沥青混合料的高低温性能和水稳定性.通过对试验结果进行方差分析,确定影响再生沥青混合料空隙率及路用性能的各种因素的主次顺序及其显著性水平.最终,综合考虑再生沥青混合料的目标空隙率、路用性能和经济性,确定各因素的最佳组合方案.

### 1.2.2 仿生物基温拌再生剂的作用效果分析

采用IRTracer-100型傅里叶红外光谱仪(FTIR)对再生沥青混合料试样进行测试,其波数范

围为 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率为 $4\text{ cm}^{-1}$ .通过压力老化法(PAV)制备老化SBS改性沥青:先将SBS改性沥青置于单个盛样盘中,每盘质量为 $(50\pm 0.5)\text{ g}$ ;再在 $100^{\circ}\text{C}$ 下施加 $(2.1\pm 0.1)\text{ MPa}$ 压力,并持续老化 $20\text{ h}\pm 10\text{ min}$ .

对原样SBS改性沥青、老化SBS改性沥青及掺最佳掺量仿生物基温拌再生剂的SBS改性沥青(再生沥青)进行FTIR测试.从微观角度定性分析FTIR光谱中特征峰的变化情况,并计算特征官能团的指数,以评估老化沥青的再生效果.

## 2 结果与分析

### 2.1 再生沥青混合料路用性能影响因素

#### 2.1.1 空隙率

沥青混合料的空隙率能够很好地评价混合料的各项性能,4%的空隙率可以保证沥青混合料具有良好的使用性能.25组再生沥青混合料试件的空隙率方差分析结果见表5.

由表5可知:试件击实成型温度的 $F$ 值为17.20,大于 $\alpha=0.01$ 水平上的临界值( $F_{0.01}(4,12)$ )5.41,表明试件击实成型温度在 $\alpha=0.01$ 水平上对空隙率影响显著;RAP掺量的 $F$ 值为41.10,远大于 $\alpha=0.01$ 水平上的临界值( $F_{0.01}(4,12)$ )5.41,表明RAP掺量在 $\alpha=0.01$ 水平上对空隙率影响非常显著;仿生

物基温拌再生剂掺量的 $F$ 值为1.40,小于 $\alpha=0.1$ 水平上的临界值( $F_{0.1}(4,12)$ )2.48,表明仿生物基温拌再生剂掺量在 $\alpha=0.1$ 水平上对空隙率影响不显著.因此,影响试件空隙率的主要因素按重要性排序为RAP掺量、试件击实成型温度、仿生物基温拌再生剂掺量.

根据各组试验数据绘制各因素对再生沥青混合料空隙率的影响,其变化趋势如图1所示.由图1可见:(1)随着试件击实成型温度的升高,试件空隙率逐渐降低;随着RAP掺量的增加,试件空隙率显著增大;随着仿生物基温拌再生剂掺量增加,试件空隙率逐渐减小.(2)当试件击实成型温度为120℃、RAP掺量为60%且仿生物基温拌再生剂掺量为3.0%时,试件的空隙率接近目标空隙率4.0%.该组合为最优组合.

表5 空隙率方差分析结果

Table 5 Variance analysis results of air void

Source of variation	Sum of square of deviation	Degree of freedom	Mean square	$F$ -value	Critical value
A	11.836	4	2.959	17.20	$F_{0.1}(4,12)=2.48$
B	28.379	4	7.095	41.10	$F_{0.05}(4,12)=3.26$
C	0.980	4	0.245	1.40	$F_{0.01}(4,12)=5.41$
Error	2.070	12	0.172		

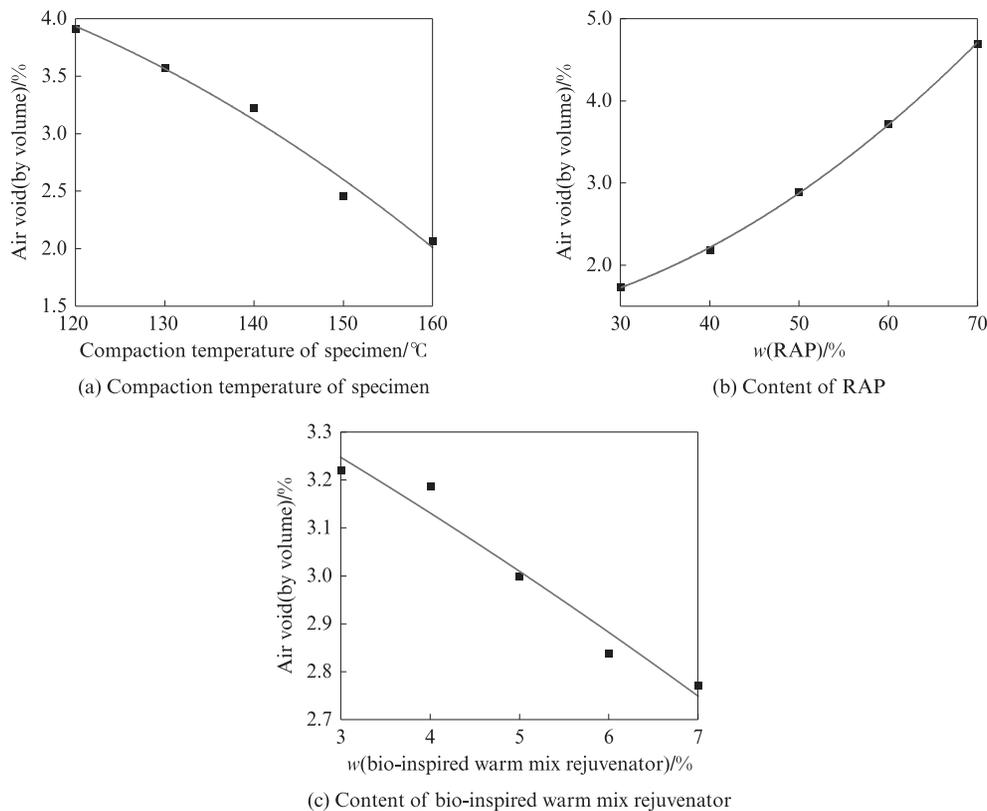


图1 各因素对空隙率的影响

Fig. 1 Influence of various factors on air void

#### 2.1.2 高温稳定性

采用单轴贯入试验分析各因素对再生沥青混合

料高温稳定性的影响.单轴贯入试验温度为60℃,加载速率为1 mm/min.25组再生沥青混合料试件的单

轴贯入强度方差分析结果见表6.

由表6可知:试件击实成型温度的 $F$ 值为4.90,小于 $\alpha=0.01$ 水平上的临界值( $F_{0.01}(4,12)$ )5.41,大于 $\alpha=0.05$ 水平上的临界值( $F_{0.05}(4,12)$ )3.26,表明在试件击实成型温度在 $\alpha=0.05$ 水平上对单轴贯入强度影响显著;RAP掺量的 $F$ 值为30.30,大于 $\alpha=0.01$ 水平上的临界值( $F_{0.01}(4,12)$ )5.41,表明RAP掺量在

$\alpha=0.01$ 水平上对单轴贯入强度影响显著;仿生物基温拌再生剂掺量的 $F$ 值为1.10,小于 $\alpha=0.1$ 水平上的临界值( $F_{0.1}(4,12)$ )2.48,表明仿生物基温拌再生剂掺量在 $\alpha=0.1$ 水平上对单轴贯入强度影响不显著.因此,影响试件单轴贯入强度的主要因素按重要性排序为RAP掺量、试件击实成型温度、仿生物基温拌再生剂掺量.

表6 单轴贯入强度方差分析结果  
Table 6 Variance analysis results of uniaxial penetration strength

Source of variation	Sum of square of deviation	Degree of freedom	Mean square	F-value	Critical value
A	0.050	4	0.013	4.90	$F_{0.1}(4,12)=2.48$
B	0.312	4	0.078	30.30	$F_{0.05}(4,12)=3.26$
C	0.011	4	0.003	1.10	$F_{0.01}(4,12)=5.41$
Error	0.031	12	0.003		

根据各组试验数据绘制各因素对温拌再生沥青混合料贯入强度影响,其变化趋势如图2所示.由图2可知:(1)随着试件击实成型温度的提高,试件贯入强度逐渐提高;随着RAP掺量的增加,试件贯入强度显著提高;随着仿生物基温拌再生剂掺量的增加,试件贯入强度呈先增大后减小趋势.(2)当试件击实成型温度为160℃、RAP掺量为70%且仿生物基温拌

再生剂掺量为4.0%时,再生沥青混合料的高温稳定性较好,该组合为最优组合.

2.1.3 低温抗裂性

采用低温劈裂强度试验分析各因素对再生沥青混合料低温抗裂性的影响.低温劈裂强度试验温度为-10℃,加载速率为1mm/min.25组再生沥青混合料试件的低温劈裂强度方差分析结果见表7.

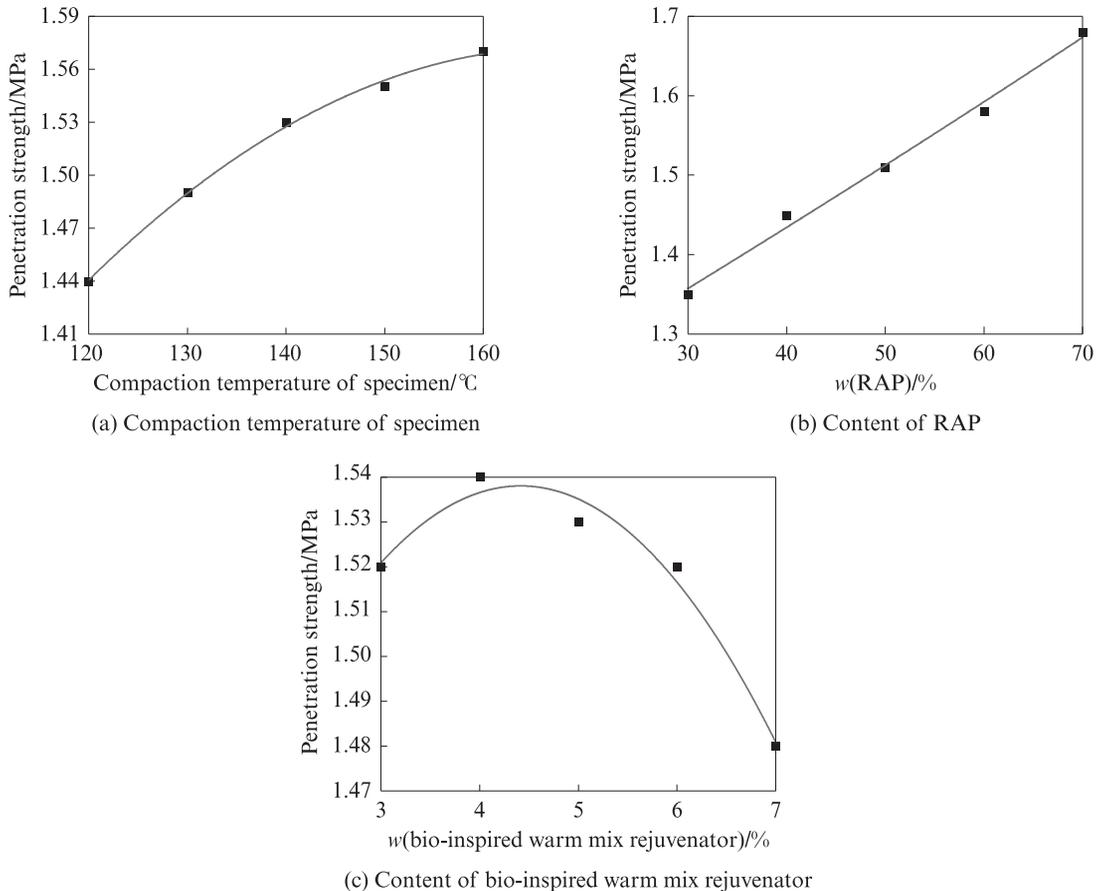


图2 各因素对贯入强度的影响

Fig. 2 Influence of various factors on penetration strength

表7 低温劈裂强度方差分析结果  
Table 7 Variance analysis results of low-temperature splitting strength

Source of variation	Sum of square of deviation	Degree of freedom	Mean square	F-value	Critical value
A	2.008	4	0.502	3.60	$F_{0.1}(4,12)=2.48$
B	3.499	4	0.875	6.30	$F_{0.05}(4,12)=3.26$
C	1.229	4	0.307	2.20	$F_{0.01}(4,12)=5.41$
Error	1.664	12	0.139		

由表7可知:试件击实成型温度的 $F$ 值为3.60,小于 $\alpha=0.01$ 水平上的临界值( $F_{0.01}(4,12)$ )5.41,大于 $\alpha=0.05$ 水平上的临界值( $F_{0.05}(4,12)$ )3.26,表明试件击实成型温度在 $\alpha=0.05$ 水平上对低温劈裂强度影响显著;RAP掺量的 $F$ 值为6.30,大于 $\alpha=0.01$ 水平上的临界值( $F_{0.01}(4,12)$ )5.41,表明RAP掺量在 $\alpha=0.01$ 水平上对低温劈裂强度影响显著;仿生物基温拌再生剂掺量的 $F$ 值为2.20,小于 $\alpha=0.1$ 水平上的临界值( $F_{0.1}(4,12)$ )2.48,表明仿生物基温拌再生剂掺量在 $\alpha=0.1$ 水平上对低温劈裂强度影响不显著.因此,影响试件低温劈裂强度的主要因素按重要性排

序为RAP掺量、试件击实成型温度、仿生物基温拌再生剂掺量.

根据各组试验结果绘制各因素对再生沥青混合料低温劈裂强度的影响,其变化趋势如图3所示.由图3可知:(1)提高试件击实成型温度能够在一定程度上改善试件的低温劈裂强度;当RAP掺量超过50%时,试件低温劈裂强度显著下降;随着仿生物基温拌再生剂掺量的增加,试件的低温劈裂强度总体呈下降趋势.(2)当试件击实成型温度为150℃、RAP掺量为50%且仿生物基温拌再生剂掺量为6.0%时,试件低温劈裂强度较高,该组合为最优组合.

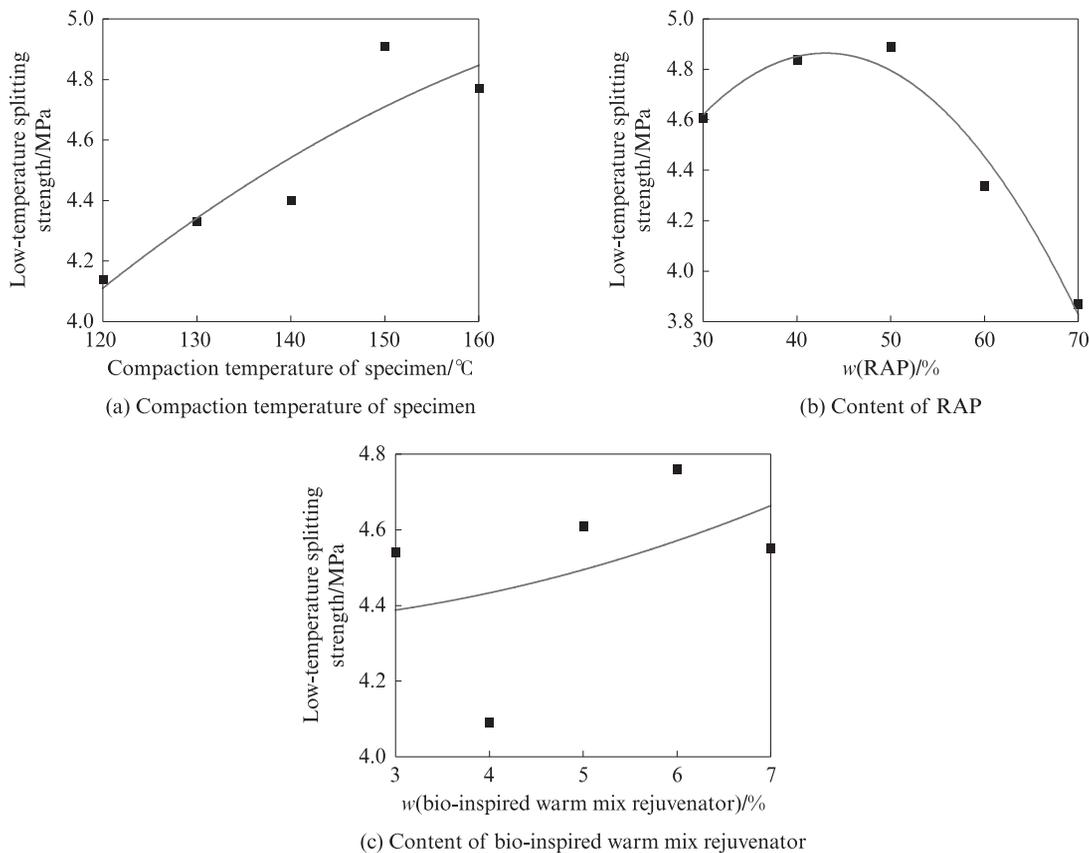


图3 各因素对低温劈裂强度的影响  
Fig. 3 Influence of various factors on low-temperature splitting strength

2.1.4 水稳定性

对冻融试件进行60℃单轴贯入强度试验,计算冻融试件的单轴贯入强度与未冻融试件单轴贯入强度的比值,该比值被定义为冻融贯入强度比.利用该指

标评价再生沥青混合料的水稳定性.25组再生沥青混合料试件的冻融贯入强度比方差分析结果见表8.

由表8可知:试件击实成型温度的 $F$ 值为9.60,大于 $\alpha=0.01$ 水平上的临界值( $F_{0.01}(4,12)$ )5.41,表明

试件击实成型温度在 $\alpha=0.01$ 水平上对冻融贯入强度比影响显著;RAP掺量的 $F$ 值为1.50,小于 $\alpha=0.1$ 水平上的临界值( $F_{0.1}(4,12)$ )2.48,表明RAP掺量在 $\alpha=0.1$ 水平上对冻融贯入强度比影响不显著;仿生物基温拌再生剂掺量的 $F$ 值为1.45,也小于 $\alpha=0.1$ 水平上的临界值( $F_{0.1}(4,12)$ )2.48,表明仿生物基温拌再生剂掺量对冻融贯入强度比影响不显著,但其 $F$ 值小于RAP掺量的 $F$ 值.因此,影响试件冻融贯入强度比的主要因素按重要性排序为试件击实成型温

度、RAP掺量、仿生物基温拌再生剂掺量.

根据各组试验数据绘制各因素对再生沥青混合料冻融贯入强度比的影响,其变化趋势如图4所示.由图4可见:(1)随着试件击实成型温度的提高,试件冻融贯入强度比显著增大,表明提高试件击实成型温度可有效改善温拌再生沥青混合料的水稳定性.(2)当试件击实成型温度为 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、RAP掺量为 $40\%$ 且仿生物基温拌再生剂掺量为 $5.0\%$ 时,试件冻融贯入强度比较大,该组合为最优组合.

表8 冻融贯入强度比方差分析结果

Table 8 Results of variance analysis for freeze-thaw penetration strength ratio

Source of variation	Sum of square of deviation	Degree of freedom	Mean square	$F$ -value	Critical value
A	3 188.291	4	797.073	9.6	$F_{0.1}(4,12)=2.48$
B	495.656	4	123.914	1.5	$F_{0.05}(4,12)=3.26$
C	488.256	4	122.064	1.45	$F_{0.01}(4,12)=5.41$
Error	994.352	12	82.863		

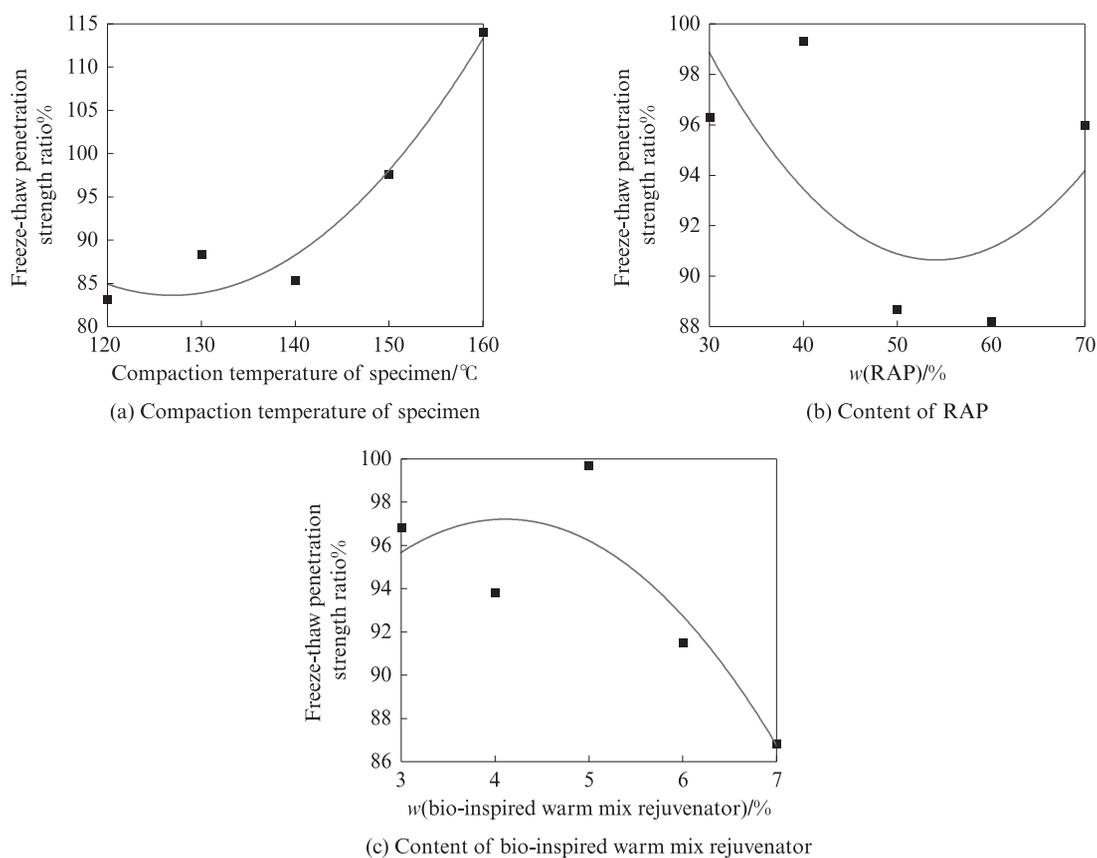


图4 各因素对冻融贯入强度比的影响

Fig. 4 Influence of various factors on freeze-thaw penetration strength ratio

## 2.2 确定再生沥青混合料最优组合及路用性能验证

为了实现节能减排目标,在确保再生沥青混合料各项性能指标均满足实体工程规范要求的基础上,从固废循环利用率和经济成本角度出发,考虑采取以下措施:降低试件击实成型温度,提高RAP掺量,降低仿生物基温拌再生剂掺量.

综上分析再生混合料在不同因素水平组合下的空隙率、高低温性能与水稳定性变化趋势,确定最优组合为: $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试件击实成型温度+ $50\%$ RAP掺量+ $4.5\%$ 仿生物基温拌再生剂掺量.对该组合下的再生沥青混合料空隙率与路用性能进行验证.采用车辙试验评价再生混合料的高温稳定性,采用小梁弯

曲试验评价再生混合料的低温抗裂性,采用冻融劈裂试验评价温拌再生混合料的水稳定性<sup>[12]</sup>.本研究验证试验结合丹东市丹霍线修复养护工程温拌再生一体化路面(养护桩号 K12+640~K13+000 上行方向),对室内拌制的再生混合料与实体工程现场拌和的混合料进行性能试验,结果见表9.

由表9可知,再生混合料试件击实成型温度为130℃、RAP掺量为50%且仿生物基温拌再生剂掺量为4.5%时,温拌再生沥青混合料的空隙率、高温

稳定性、低温抗裂性及水稳定性均能满足规范要求.

### 2.3 仿生物基温拌再生剂改性机理

沥青老化过程中性能的衰减源自于内在组分迁移,主要是轻质组分向重质组分的转变,体现在芳香分发生氧化作用向胶质和沥青质转化<sup>[13]</sup>.仿生物基温拌再生剂、原样SBS改性沥青、老化SBS改性沥青与再生SBS改性沥青(仿生物基温拌再生剂掺量为4.5%)的红外光谱如图5所示.

表9 最优组合下再生沥青混合料路用性能验证试验结果

Table 9 Results of pavement performance verification tests for warm mix recycled asphalt mixtures at optimal combination

Test item	Test result	Test result in the field	Standard requirement
Bulk specific gravity	2.460	2.451	
Theoretical maximum specific gravity	2.546	2.547	
Air void(by volume)/%	3.40	3.77	3-5
60℃ rutting stability/(time·mm <sup>-1</sup> )	3 456	3 415	≥2 400
-10℃ low temperature bending failure strain/(μm·m <sup>-1</sup> )	4 380	3 846	≥2 800
Freeze-thaw splitting tensile strength ratio/%	98.9	96.3	≥75

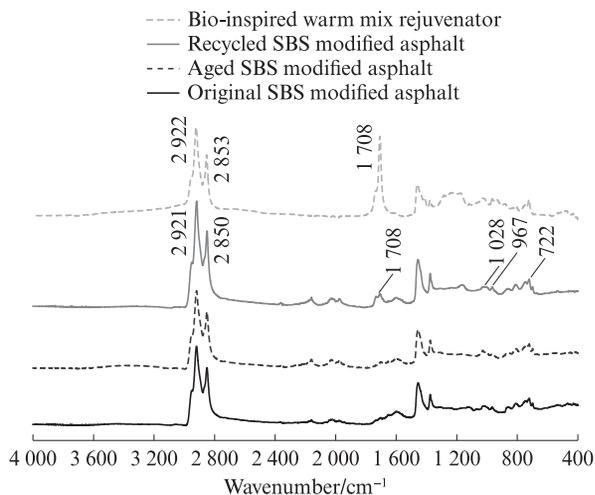


图5 仿生物基温拌再生剂及3种SBS改性沥青的红外光谱

Fig. 5 FTIR spectra of bio-inspired warm mix rejuvenator and three kinds of SBS modified asphalts ( $w$ (bio-inspired warm mix rejuvenator)=4.5%)

由图5可见:(1)仿生物基温拌再生改性沥青与原样SBS改性沥青和老化SBS改性沥青的官能团吸收峰形状具有较高相似性.其中,2 921、2 850 cm<sup>-1</sup>处强吸收峰主要由亚甲基(-CH<sub>2</sub>-)中碳氢单键(C-H)的非对称伸缩振动引起;1 028 cm<sup>-1</sup>处吸收峰对应亚砷基(S=O);967 cm<sup>-1</sup>处吸收峰为SBS改性沥青中的丁二烯引起;722 cm<sup>-1</sup>处吸收峰由苯环取代物中的C-H弯曲振动产生<sup>[14]</sup>.(2)在2 921 cm<sup>-1</sup>处,老化SBS改性沥青的吸收峰强度相较原样SBS改性沥青有所减小,加入仿生物基温拌再生剂后该处的吸收

峰强度增大.表明沥青老化后沥青组分中的饱和烃含量减少,仿生物基温拌再生剂中的轻质油对老化沥青起到再生效果.(3)在1 708 cm<sup>-1</sup>处,仿生物基温拌再生改性沥青中的羰基(C=O)振动吸收峰强度明显增大,这是由于仿生物基温拌再生剂在此处存在酮羰基(-CO-)<sup>[15]</sup>,与老化沥青发生了物理共混,导致吸收峰强度增大.

为了进一步分析老化SBS改性沥青的再生过程,根据文献[16],以1 457 cm<sup>-1</sup>处的C-H振动峰为参照,通过定量积分计算原样SBS改性沥青、老化SBS改性沥青与再生SBS改性沥青的丁二烯指数( $a_{BI}$ )、亚砷基指数( $a_{SI}$ )和羰基指数( $a_{CI}$ ),计算式见(1)~(3),计算结果见表10.

$$a_{BI} = \frac{A_{C=C}}{A_{C-H}} \quad (1)$$

$$a_{SI} = \frac{A_{S=O}}{A_{C-H}} \quad (2)$$

$$a_{CI} = \frac{A_{C=O}}{A_{C-H}} \quad (3)$$

式中: $A_{C=C}$ 为丁二烯碳碳双键吸收峰面积; $A_{S=O}$ 为亚砷基吸收峰面积; $A_{C=O}$ 为羰基吸收峰面积; $A_{C-H}$ 为饱和碳氢单键弯曲振动吸收峰面积.

由表10可知:(1)SBS改性沥青经老化后 $a_{BI}$ 减小,而 $a_{SI}$ 和 $a_{CI}$ 增大,表明SBS改性沥青老化后SBS分子中的丁二烯分子链发生断裂<sup>[17]</sup>,沥青中的硫、碳元素发生氧化与聚合等反应,生成亚砷基和羰基<sup>[18]</sup>.这也解释了沥青的氧化反应使得老化沥青的高温性

表 10 3种SBS改性沥青的 $a_{BI}$ 、 $a_{SI}$ 和 $a_{CI}$ 计算结果  
Table 10  $a_{BI}$ ,  $a_{SI}$  and  $a_{CI}$  calculation results of three kinds of SBS modified asphalts

Type	$a_{BI}$	$a_{SI}$	$a_{CI}$
Original SBS modified asphalt	0.014 5	0.116 0	0.008 5
Aged SBS modified asphalt	0.012 4	0.128 3	0.010 7
Recycled SBS modified asphalt( $\omega$ (bio-inspired warm mix rejuvenator)= 4.5%)	0.013 7	0.095 7	0.196 6

能有所提升,再生混合料高温性能随之提高,而低温性能随之下降。(2)老化SBS改性沥青中加入仿生物基温拌再生剂后 $a_{BI}$ 增大,表明仿生物基温拌再生剂补充了老化沥青中的丁二烯,恢复了丁二烯C=C键的作用,对SBS改性剂产生了一定的恢复效果,但无法达到原样沥青水平。(3)再生SBS改性沥青的 $a_{SI}$ 值较老化SBS改性沥青有所下降,表明再生SBS改性沥青中含氧官能团含量略有降低,由氧化所导致的沥青老化现象得到一定恢复。故仿生物基温拌再生剂的加入能够使得老化SBS改性沥青的低温性能提高,从而提升了再生混合料的低温性能。(4)再生SBS改性沥青的 $a_{CI}$ 显著增大,表明仿生物基温拌再生剂中富含酮、羧酸类化合物。结合定性分析来看,仿生物基温拌再生剂能够有效恢复老化SBS改性沥青的官能团结构,改善其性能。

### 3 结论

(1)各因素对温拌再生沥青混合料空隙率的影响主次顺序为沥青混合料回收料(RAP)掺量>试件击实成型温度>仿生物基温拌再生剂掺量;对高温性能的影响主次顺序为RAP掺量>试件击实成型温度>仿生物基温拌再生剂掺量;对低温性能的影响主次顺序为RAP掺量>试件击实成型温度>仿生物基温拌再生剂掺量;对水稳定性的影响主次顺序为试件击实成型温度>RAP掺量>仿生物基温拌再生剂掺量。

(2)基于试验结果的综合分析与经济考量,确定试件击实成型温度130℃,RAP掺量50%,仿生物基温拌再生剂掺量4.5%为最优组合。为验证该组合在实际应用中的路用性能,结合实体工程对其进行高温车辙试验、低温小梁弯曲试验及冻融劈裂试验。试验结果表明,该再生混合料路用性能达到规范要求。

(3)仿生物基温拌再生剂中存在的轻质油能够补充老化SBS改性沥青的轻质组分,且在一定程度上恢复了老化SBS改性沥青中丁二烯C=C双键的功能。再生SBS改性沥青中含氧官能团含量下降,老化SBS改性沥青的氧化问题得到一定程度的解决。仿生物基温拌再生剂能够有效改善老化SBS改性沥青的性能,再生效果良好。

### 参考文献:

- [1] 金鑫,付昊轩,杨野,等. 沥青温拌再生剂研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2023, 37(增刊2):183-190.  
JIN Xin, FU Haoxuan, YANG Ye, et al. Research status and development trends of asphalt warm mix regeneration. [J]. Materials Reports, 2023, 37(Suppl 2):183-190. (in Chinese)
- [2] 李强,陆杨,王家庆,等. 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.  
LI Qiang, LU Yang, WANG Jiaqing, et al. Secondary aging performance of warm-mix recycled asphalt binder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(4):102-116. (in Chinese)
- [3] 中国公路学报编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3):1-36.  
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's road engineering research: 2013[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3):1-36. (in Chinese)
- [4] 贺海,王朝辉,孙晓龙,等. 新型温拌改性沥青的研发及其路用性能[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5):927-932.  
HE Hai, WANG Zhaohui, SUN Xiaolong, et al. Research and development of new warm mix modified asphalt and its road performance[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5):927-932. (in Chinese)
- [5] SONG W M, HUANG B S, SHU X. Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 192:191-198.
- [6] YOUSEFIA, BEHNOOD A, NOWRUZI A, et al. Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP)[J]. Construction and Building Materials, 2021, 268:121200.
- [7] 季节,奚进,谢永清. 温拌再生沥青混合料性能试验[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1):106-109.  
JI Jie, XI Jin, XIE Yongqing. Experimental evaluation of performances of warm-recycling mixture asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1):106-109. (in Chinese)
- [8] 陈静云,马强. 温拌-再生改性沥青SMA混合料性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(2):286-290.  
CHEN Jingyun, MA Qiang. Properties of warm mix-recycled modified asphalt SMA mixture[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2012, 28(2):286-290. (in Chinese)
- [9] 刘唐志,朱洪洲,李佳坤,等. 温拌再生沥青混合料水稳定性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(3):54-58.  
LIU Tangzhi, ZHU Hongzhou, LI Jiakun, et al. Research on

- water stability of warm-recycled asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(3): 54-58. (in Chinese)
- [10] 刘唐志,孔令云,成志强.基于Evotherm™温拌再生沥青混合料路用性能的RAP掺量确定[J].公路工程,2014,39(3): 52-55,119.  
LIU Tangzhi, KONG Lingyun, CHENG Zhiqiang. Determination of RAP dosage based on properties of warm mix reclaimed asphalt with Evotherm™[J]. Highway Engineering, 2014, 39(3): 52-55, 119. (in Chinese)
- [11] 杨彦海,金鑫,杨野.一种仿生物基环保型温拌再生剂及其制备方法和应用:202311546092.9 [P].2023-11-20.  
YANG Yanhai, JIN Xin, YANG Ye. An environment friendly bio-based warm mix rejuvenator and its preparation method and application:202311546092.9 [P]. 2023-11-20. (in Chinese)
- [12] 郭乃胜,尤占平,赵颖华,等.考虑再生剂作用的温拌再生沥青混合料路用性能[J].建筑材料学报,2015,18(4):674-681.  
GUO Naisheng, YOU Zhanping, ZHAO Yinghua, et al. Performance of warm mix asphalt with recycled asphalt mixtures considering the effect of rejuvenating agent[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4): 674-681. (in Chinese)
- [13] 张宏飞,张久鹏,王帅,等.沥青化学组分与宏观性能靶向关系研究综述与展望[J].材料导报,2025,39(4):60-74.  
ZHANG Hongfei, ZHANG Jiupeng, WANG Shuai, et al. Review and prospect of the target relationship between chemical components and macroscopic properties of asphalt[J]. Materials Reports, 2025, 39(4): 60-74. (in Chinese)
- [14] 冯新军,傅豪,段湖杰.萃取法生物油基再生沥青性能及再生机理[J].长安大学学报(自然科学版),2024,44(2):12-21.  
FENG Xinjun, FU Hao, DUAN Hujie. Performance and regeneration mechanism of bio-oil-based recycled asphalt by extraction method[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(2): 12-21. (in Chinese)
- [15] 斯李.糠醛抽出油对不同老化程度沥青的再生效果研究[D].广州:华南理工大学,2021.  
SI Li. Regeneration of different aging degree asphalt by furfural extraction oil effect study[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [16] 赵永利,顾凡,黄晓明.基于FTIR的SBS改性沥青老化特性分析[J].建筑材料学报,2011,14(5):620-623.  
ZHAO Yongli, GU Fan, HUANG Xiaoming. Analysis on SBS modified asphalt aging characterization based on Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5): 620-623. (in Chinese)
- [17] 李韦剑.温拌再生改性沥青及其混合料性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.  
LI Weijian. Study on the performance of warm mix recycled modified asphalt and its mixture [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [18] 张梦缘.温拌再生SBS改性沥青及其混合料性能研究[D].西安:长安大学,2021.  
ZHANG Mengyuan. Study on performance of warm mix recycled SBS asphalt and asphalt mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)