

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.039

# 蜡基温拌剂对废橡胶粉改性沥青车辙与疲劳性能的影响

李佳庆

(岳阳路桥集团有限公司,湖南 岳阳 414000)

**摘要:**现行工艺中废橡胶粉改性沥青(CRMA)生产所需的拌和与压实温度较高,往往通过添加温拌剂加以改进。为了探究温拌剂的添加对CRMA车辙与疲劳性能的影响,该文通过在CRMA中掺入两种蜡基(松蜡和聚丙烯蜡)温拌剂,开展旋转黏度(RV)、动态剪切流变仪(DSR)、多重应力蠕变恢复(MSCR)及线性振幅扫描(LAS)试验,以评价温拌剂对CRMA的车辙与疲劳性能的影响。结果表明:添加两种蜡基温拌剂可以明显降低CRMA的黏度;由于不可恢复蠕变柔量( $J_{nr,0.2}$ )较低及应变恢复率( $R$ )较高,掺加2%的聚丙烯蜡CRMA相比4%和6%掺量聚丙烯蜡的CRMA具有更优抗车辙性能;LAS试验结果表明:掺有6%松蜡的CRMA具有最长的疲劳寿命,尤其是在低应变水平下。

**关键词:**蜡基;废橡胶粉;改性沥青;温拌剂;车辙;疲劳

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

由于沥青路面产生永久变形、疲劳开裂等病害,导致其养护成本增加及使用寿命缩短。研究表明,沥青混合料组分中结合料对混合料性能影响很大,结合料的流变特性与混合料的车辙、疲劳性能直接相关<sup>[1]</sup>。因此,已有大量研究通过改善结合料的性能以提高混合料的抗车辙与疲劳性能,其中应用最为广泛的是添加各种改性剂<sup>[2]</sup>。

研究发现,在沥青中掺入废橡胶粉(CRM)能提高沥青的抗老化性能,且废橡胶粉改性沥青(CRMA)混合料的抗车辙与疲劳性能明显优于基质沥青混合料,使路面使用寿命大大延长<sup>[3]</sup>。然而,与基质沥青相比,CRMA黏度较高<sup>[4]</sup>,生产过程中往往需要较高的拌和与压实温度,导致大量的燃料消耗及有毒气体排放。而且,压实温度过低,生产中无法获得合适的沥青混合料体积特性(空隙率和压实度),致使路面在短期和长期内表现出不良性能<sup>[5]</sup>。

近年来,温拌沥青(WMA)技术成为研究热点,

通过在废橡胶粉沥青中掺入不同类型的温拌剂,其黏度明显降低,从而混合料的拌和与压实温度显著降低<sup>[6-10]</sup>。然而,温拌剂的掺入对CRMA的疲劳与车辙性能有着不同的影响。Xiao等<sup>[11]</sup>发现温拌剂提高了CRMA的抗车辙性能,但降低了其抗疲劳性能;Yu等<sup>[12]</sup>发现在高温条件下,含有Evotherm温拌剂的CRMA呈现出较差的抗车辙与抗疲劳性能;Wang等<sup>[13]</sup>研究了两种温拌剂对CRMA的高温和中温性能的影响,结果表明蜡基和化学基温拌剂均会降低CRMA的车辙和疲劳性能;但是,Wen等<sup>[14]</sup>研究表明蜡基温拌剂可以提高CRMA的疲劳性能和耐车辙性。综上所述,温拌剂的类型对CRMA的性能影响较大,选用合适的温拌剂对CRMA的车辙与疲劳性能至关重要。因此,有必要对掺入不同类型温拌剂的CRMA性能进行评估,从而为CRMA混合料生产过程中选取合适的温拌剂及掺量提供参考。

基于此,本文主要研究蜡基温拌剂的掺入对CRMA的疲劳和车辙性能的影响。选取不同掺量的两种蜡基(松蜡和聚丙烯蜡)温拌剂掺入到CRMA中,开展了旋转黏度、动态剪切流变仪、多次应力蠕

收稿日期:2023-05-06(修改稿)

基金项目:湖南省自然科学基金青年基金资助项目(编号:2018JJ3550)

作者简介:李佳庆,男,硕士,高级工程师.E-mail:7324505@qq.com

变恢复和线性振幅扫描试验,基于测试结果对比评价了不同掺量温拌剂下CRMA的车辙与疲劳性能。

## 1 原材料与试验设计

### 1.1 原材料

采用70#基质沥青,三大性能指标见表1。采用15%掺量的CRM作为改性剂,最大尺寸为0.425 mm。采用松蜡和聚丙烯蜡作为温拌剂,主要特性见表2。

表1 70#基质沥青性能指标

性能指标	单位	试验结果	技术要求
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	64	60~80
延度(15℃,5 cm/min)	cm	>100	≥100
软化点(环球法)	℃	48.5	≥46

表2 松蜡与聚丙烯蜡性能指标

性能指标	单位	松蜡	聚丙烯蜡
黏度(135℃)	$10^{-3}$ Pa·s	20±5	30
密度(15℃)	g/cm <sup>3</sup>	0.81~0.83	0.92±0.02
熔点	℃	105±5	110±3
闪点	℃	≥230	≥250
油含量	%	7~12	≤2
颜色		浅褐色	白色
水中溶解度		不溶	不溶

### 1.2 试样制备

采用松蜡和聚丙烯蜡的用量分别占基质沥青的2%、4%和6%。为了制备改性沥青,首先,在180℃下,使用高速剪切仪以3 600 rpm的转速将基质沥青与15%用量的CRM剪切45 min;之后,将蜡基温拌剂掺入到CRMA中;最后,在160℃下,以相同剪切速率再剪切10 min以获取试样。总共制备7组试样用于试验,试样标号如表3所示。此外,为了在试验室中模拟沥青的短期和长期老化,根据规范要求,对试样分别进行滚动薄膜烘箱(RTFO)试验和压力老化容器(PAV)试验。

### 1.3 试验设计

#### 1.3.1 旋转黏度(RV)试验

RV测试选取温度为135℃(标准测试温度)、165℃和185℃。根据SHRP标准,改性沥青135℃黏

度不得超过3 Pa·s,以此技术要求来控制改性沥青的施工性能。

表3 沥青试样标号

标号	CRM/%	松蜡/%	聚丙烯蜡/%
CR15	15	—	—
CR15S2	15	2	—
CR15S4	15	4	—
CR15S6	15	6	—
CR15P2	15	—	2
CR15P4	15	—	4
CR15P6	15	—	6

#### 1.3.2 动态剪切流变仪(DSR)试验

DSR试验通过测试复数剪切模量( $G^*$ )和相位角( $\delta$ )来评价沥青的弹性和黏性性能。SHRP定义了从DSR试验获得的车辙因子( $G^*/\sin \delta$ )用以评估沥青的抗车辙性能, $G^*/\sin \delta$ 越高,表明沥青抗车辙性能越好。对于未老化和经RTFO老化的胶结料,其 $G^*/\sin \delta$ 参数分别要高于1 kPa和2.2 kPa。此外,参数 $G^*\sin \delta$ 也被定义用于评估沥青在中温下的疲劳性能。根据SHRP要求,对于经PAV老化的胶结料,可以通过限制 $G^*\sin \delta$ 小于5 000 kPa来控制疲劳开裂。

#### 1.3.3 多重应力蠕变恢复(MSCR)试验

有研究表明 $G^*/\sin \delta$ 参数不能完整地表征沥青车辙性能,特别是对应力水平敏感的聚合物改性沥青。基于此,联邦公路管理局引入了MSCR试验来评估沥青的车辙性能,之后由Bouldin等<sup>[15]</sup>对此试验方法进行拓展与改进,其测试的有效性得到了充分的验证。

在本研究中,对经RTFO老化沥青在64℃下进行了MSCR试验,采用了0.1 kPa和3.2 kPa两个应力水平。MSCR试验中主要得到两个参数:不可恢复的蠕变柔量( $J_{nr}$ )和应变恢复率( $R$ )。此外,通过两个应力水平下的 $J_{nr}$ 计算出 $J_{nr-diff}$ 参数,该参数用于评估沥青的应力水平敏感性。

#### 1.3.4 线性振幅扫描(LAS)试验

目前研究中,先后有不同参数被提出用来评估沥青的疲劳性能。其中包括SHRP引入的沥青疲劳参数评价指标 $G^*\sin \delta$ ,但该参数是在线性黏弹性范围内确定的,并具有较小的剪切应变,其与沥青疲劳

性能相关性较差,用作疲劳性能评价指标并不可靠。之后,NCHRP 9-10 研究计划提出时间扫描试验来评价沥青疲劳性能,但该试验所基于的应力或应变水平,其耗时非常长,不适合常规测试。为了解决上述问题,目前广泛采用的 LAS 试验,其作为一种用于测试荷载振幅增加而导致的损伤累积,能有效预估沥青的疲劳性能,且大大节省试验时间。

本研究中,基于 AASHTO TP101 规范,在 25 °C 下,对经 PAV 老化沥青进行 LAS 试验。此外,使用黏弹性连续体损伤(VECD)理论分析了 LAS 试验结果,如式(1)所示:

$$N_f = A(\gamma_{\max})^{-B} \quad (1)$$

式中: $N_f$ 为疲劳破坏的循环次数; $\gamma_{\max}$ 为在给定路面结构下的沥青最大期望应变; $A$ 和 $B$ 为从 VECD 分析中得到的疲劳模型参数。 $A$ 描述材料保持其完整性的能力,与沥青的疲劳寿命直接相关, $B$ 表示沥青对应变水平变化的敏感性, $B$ 越大,表示应变水平幅度增加越大,疲劳寿命降低更快。

## 2 结果与分析

### 2.1 RV 试验结果

图 1 显示了蜡基温拌剂对 CRMA 旋转黏度的影响。在 135 °C 时,CR15 的黏度约为基质沥青黏度的 3 倍。明显可以看到,添加两种蜡基温拌剂的 CRMA 黏度均明显降低。同等掺量下,聚丙烯蜡对降低 CRMA 的黏度更为显著。当温度为 135 °C 时,CR15P6 相比于 CR15 的旋转黏度降低约 50%。

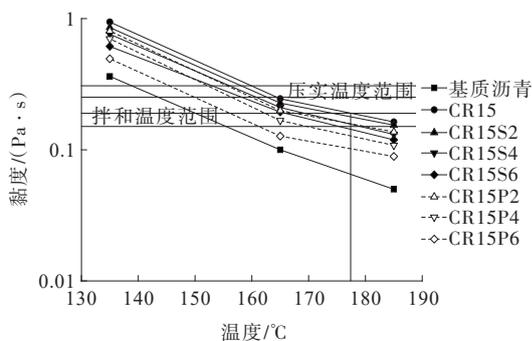


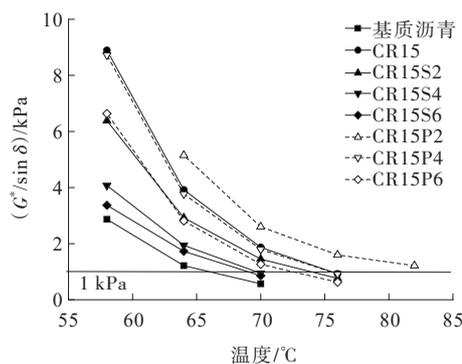
图 1 不同沥青结合料黏度试验结果

由图 1 可知:CR15 的最低拌和温度超过了 177 °C,压实温度处于 160~164 °C,而掺入两种蜡基温拌剂的拌和与压实温度均有所降低,且掺量越高,

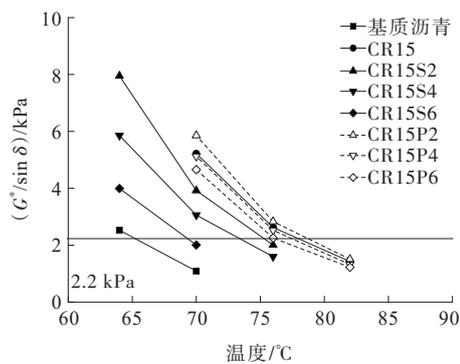
降低效果越显著。其中聚丙烯蜡相对松蜡对 CRMA 混合料拌和与压实温度降低效果更大,CR15S6 的拌和温度范围为 166~175 °C,温度降低约 10 °C,而 CR15P6 的拌和温度范围为 156~161 °C,温度降低约 20 °C。

### 2.2 DSR 试验结果

图 2 为高温条件下未老化和经 RTFO 老化的不同沥青结合料  $G^*/\sin \delta$  测试结果。可以看出:① 与基质沥青相比,所有 CRMA 的  $G^*/\sin \delta$  值均提高,表明改性沥青在高温条件下的抗车辙能力增强。此外,对于含聚丙烯蜡的 CRMA,CR15P2 车辙参数值最大,抗车辙能力随聚丙烯蜡含量的增加而降低;② 相同温度下,添加松蜡温拌剂 CRMA 的  $G^*/\sin \delta$  值均低于 CR15,表明添加松蜡对 CRMA 的抗车辙能力无积极作用。



(a) 未老化



(b) 老化

图 2 不同沥青结合料  $G^*/\sin \delta$  测试结果

表 4 为 25 °C 下不同沥青类型的 Superpave 疲劳参数的计算结果。表中所有温拌剂掺量的沥青结合料的  $G^* \cdot \sin \delta$  均不超过 5 000 kPa,满足疲劳开裂要求。Superpave 规范指出, $G^* \cdot \sin \delta$  越低,沥青疲劳性能更好。以此指标评判混合料的疲劳性能,数值显

示:含松蜡温拌剂的CRMA疲劳性能优于CR15,而含聚丙烯蜡的CRMA对疲劳性能无提升作用。

表4 25℃下不同沥青类型的Superpave疲劳参数计算结果

沥青类型	$G^*$ /kPa	$\delta/(\circ)$	$\sin \delta$	$(G^* \cdot \sin \delta)$ /kPa
基质沥青	2 160	48.0	0.742	1 605
CR15	2 040	42.4	0.674	1 375
CR15S2	1 450	43.9	0.693	1 005
CR15S4	1 400	43.7	0.690	967
CR15S6	804	44.9	0.705	567
CR15P2	2 220	41.9	0.667	1 482
CR15P4	2 490	40.9	0.654	1 630
CR15P6	2 760	40.6	0.650	1 795

### 2.3 MSCR 试验结果

图3、4显示了在0.1 kPa和3.2 kPa两个应力水平下的沥青结合料MSCR测试结果。其中, $J_{nr}$ 值越低,表示结合料抗永久变形能力更强,即抗车辙性能更

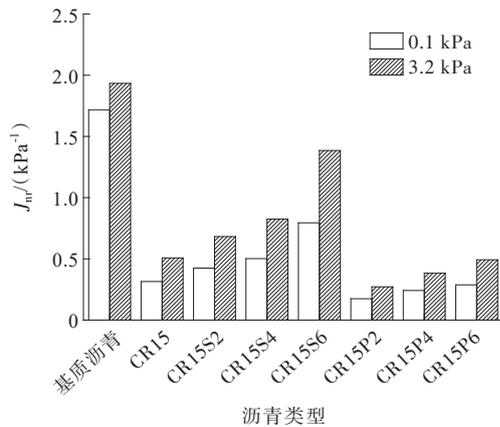


图3 不同沥青结合料 $J_{nr}$ 值测试结果

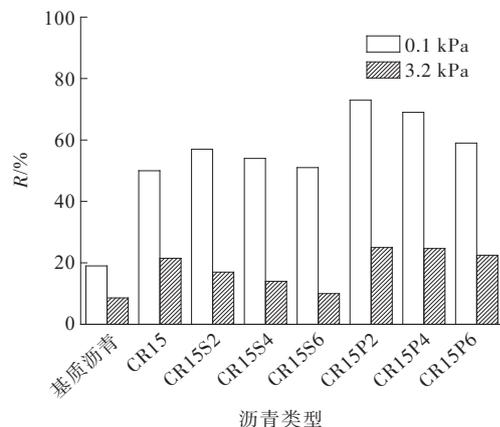


图4 不同沥青结合料R值测试结果

好。 $R$ 值越高,表明结合料的应变恢复能力更好。

由图3、4可知:①与基质沥青相比,所有CRMA的 $J_{nr}$ 值较低,而 $R$ 值较高,表明废橡胶粉改性沥青对永久变形的抵抗能力更强;②松蜡的掺入增加了CRMA的 $J_{nr}$ 值,且在3.2 kPa应力水平下,还降低了CRMA的 $R$ 值。但是,在0.1 kPa的应力水平下,松蜡的掺入使CRMA的 $R$ 值略微提高,且随着松蜡掺量的增加, $R$ 值逐渐降低。因此,与CR15相比,含松蜡的CRMA对永久变形的抵抗能力更弱;③聚丙烯蜡降低了CRMA的 $J_{nr}$ 值,并在0.1 kPa应力水平下,提高了 $R$ 值。但在3.2 kPa应力水平下, $R$ 值无明显变化。因此,聚丙烯蜡可有效改善CRMA的抗车辙性能。在8组沥青试样中,CR15P2在两种应力水平下都具有最优的抗车辙性能。

此外,本研究还计算了 $J_{nr-diff}$ 参数用以评估沥青的应力水平敏感性,该参数值越小,表示结合料对应力水平变化的敏感程度越低。图5显示了不同沥青结合料的 $J_{nr-diff}$ 参数大小关系。

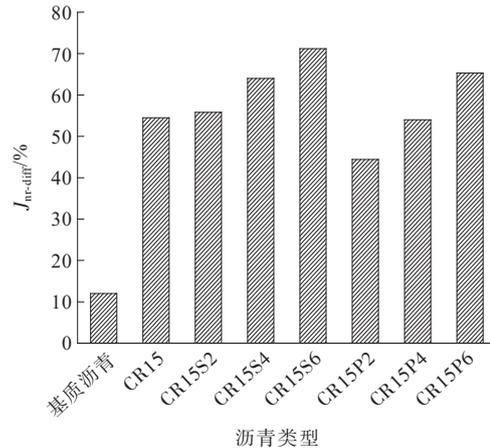


图5 不同沥青结合料 $J_{nr-diff}$ 测试结果

由图5可知:CRMA相比于基质沥青,其对应力水平变化的敏感性明显增加。随着两种蜡基添加剂的增加,CRMA的 $J_{nr-diff}$ 值均越大,但结果均满足规范要求(小于75%)。7组CRMA中,CR15S6的 $J_{nr-diff}$ 值最大,CR15P2的 $J_{nr-diff}$ 值最小,表明低掺量聚丙烯蜡降低了CRMA对应力水平变化的敏感性。

### 2.4 LAS 试验结果

不同沥青结合料的破坏特征曲线如图6所示,图6中损伤强度为疲劳损伤参数;材料完整度为完整性参数,代表 $t$ 时刻的复数模量与初始复数模量之比。通过破坏特征曲线,可在特定的损伤强度下判定沥

青结合料的材料完整性。不同类型蜡基添加剂及掺量对 CRMA 的破坏过程有不同的影响,松蜡含量较高的 CRMA 在任何特定的破坏损伤下均显示出较高的材料完整性,表明对疲劳破坏具有更好的抵抗力。然而,聚丙烯蜡掺入却降低了 CRMA 的材料完整性,对提高抗疲劳性能无正面作用。

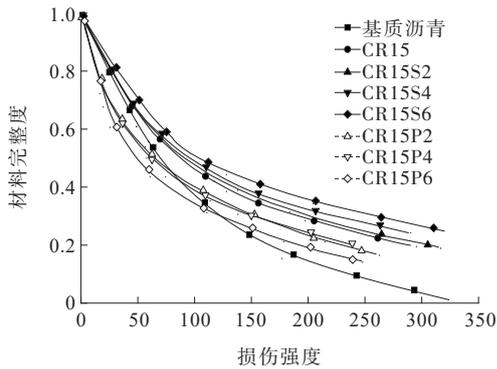


图 6 不同沥青结合料的破坏特征曲线

表 5 为沥青结合料在 2.5% 和 5.0% 两种应变水平下的疲劳寿命和 LAS 试验中计算模型 A 和 B 参数结果。

表 5 不同沥青结合料疲劳寿命及计算模型 A 和 B 参数结果

沥青类型	A 值	B 值	不同应变水平时的 $N_f$ /次	
			2.5%	5.0%
基质沥青	178 600	3.180	9 700	1 070
CR15	570 320	3.651	20 100	1 600
CR15S2	717 300	3.747	23 200	1 720
CR15S4	980 100	3.879	28 000	1 910
CR15S6	1 372 000	4.020	34 500	2 130
CR15P2	428 000	3.639	15 300	1 220
CR15P4	358 000	3.518	14 300	1 240
CR15P6	270 000	3.452	11 400	1 040

由表 5 可以看到:① CR15 的 A 参数的值与基质沥青相比增加了约 3 倍,表明废橡胶粉掺入改善了沥青的抗疲劳性能。此外,松蜡含量越高,A 值越大,表明 CRMA 抗疲劳性能越好,而聚丙烯蜡的含量增加降低了参数 A 值。与基质沥青相比,CRMA 参数 B 值更大,其中松蜡的掺入增大了 CRMA 参数 B 值,而聚丙烯蜡反之,表明前者随应变水平的变化敏感性更强;② CRMA 相比基质沥青的疲劳寿命大大延长,

原因在于 CRM 颗粒与基质沥青之间的相互作用形成聚合物网络结构,从而能有效抵抗疲劳破坏。此外,不同蜡基温拌剂对 CRMA 疲劳性能有不同的影响,松蜡延长了 CRMA 的疲劳寿命,而聚丙烯蜡相反,原因在于不同蜡基温拌剂的添加对 CRMA 的化学组成和晶体结构影响不同;③ CR15S6 在 2.5% 和 5.0% 两种应变水平下均具有最长的疲劳寿命,与 CR15 相比,CR15S2、CR15S4 和 CR15S6 胶结料的疲劳寿命在 2.5% 的应变水平下分别提高了 15%、39% 和 71%,而在 5.0% 的应变水平下分别提高了 7.5%、19% 和 33%,表明松蜡的掺入对 CRMA 疲劳性能在低应变水平下改善效果更明显。

## 2.5 讨论

基于上述试验结果,蜡基温拌剂的加入明显降低了 CRMA 的拌和与压实温度,其对 CRMA 改性沥青的生产带来了巨大的经济与环保效益。然而,不同类型蜡基温拌剂的掺入对 CRMA 车辙与疲劳性能有不同的影响,虽然蜡基温拌剂掺入降低了 CRMA 的车辙性能,聚丙烯蜡的掺入降低了 CRMA 的疲劳性能,总体上温拌剂的掺入对 CRMA 的车辙与疲劳性能影响程度不大,但相比基质沥青的性能仍有明显的提升,且可通过掺入合适的温拌剂掺量来使其对车辙与疲劳性能的负面影响降至最低。此外,可以针对不同路面结构所处的环境及服役性能要求选择合适的蜡基温拌剂,例如,在高温环境下,可选择聚丙烯蜡温拌剂以达到更优的抗车辙性能。

## 3 结论

(1) 松蜡和聚丙烯蜡的掺入均降低了 CRMA 的黏度,且掺量越多,其降低程度越明显,其中聚丙烯蜡相比于松蜡效果更显著。6% 掺量的聚丙烯蜡能使 CRMA 的旋转黏度降低约 50%,且使拌和温度降低约 20℃。

(2) 高温性能试验表明聚丙烯蜡可提高 CRMA 的高温性能,但随掺量的增加其提高效果越不显著,而松蜡降低了 CRMA 的高温性能。其中含 2% 聚丙烯蜡的 CRMA 抗车辙性能最好。

(3) LAS 试验表明松蜡可以改善 CRMA 的抗疲

劳性能,且随掺量的增加其疲劳寿命也增加,在应变水平分别为2.5%和5%时,松蜡掺量为6%的CRMA疲劳寿命分别提高了71%和33%。然而,聚丙烯蜡对改善CRMA疲劳性能效果不显著,掺量为6%的聚丙烯蜡CRMA的疲劳寿命与基质沥青无明显差别。

#### 参考文献:

- [1] SALIM R. Asphalt binder parameters and their relationship to the linear viscoelastic and failure properties of asphalt mixtures[D]. Tempe, AZ, USA: Arizona State University, 2019.
- [2] 顾绍兴,马骏,安会勇. 沥青改性剂发展综述[J]. 当代化工, 2015, 44(6): 1344-1347.
- [3] 董大伟,凌天清,江宽,等. 废轮胎橡胶粉在高黏改性沥青中的应用性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 78-84, 91.
- [4] 刘斌,胡省. 废橡胶粉/SBS复合改性沥青技术性能研究[J]. 公路工程, 2019, 44(6): 257-260.
- [5] 张飞,王岚,邢永明. 温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 174-179.
- [6] VAITKUS A, ČYGAS D, LAURINAVIČIUS A, et al. Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties[J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 800-806.
- [7] 张庆宇,康佳旺,赵毅. 高掺量胶粉/SBS复合改性沥青混合料永久变形预付模型[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 197-201.
- [8] 宋云连,蒋宇,刘恒. 温拌剂及沥青类型对混合料动态模量的影响研究[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 215-219.
- [9] 季节,马童,任万艳,等. 温拌橡胶沥青降黏作用机理研究[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 168-173.
- [10] 杨三强,孙爽,李倩,等. 胶粉改性沥青混合料动荷载力学响应分析[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 227-233.
- [11] XIAO F P, WENBIN ZHAO P E, AMIRKHANIAN S N. Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(10): 3144-3151.
- [12] YU H Y, LENG Z, XIAO F P, et al. Rheological and chemical characteristics of rubberized binders with non-foaming warm mix additives[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 671-678.
- [13] WANG H P, LIU X Y, ZHANG H, et al. Asphalt-rubber interaction and performance evaluation of rubberised asphalt binders containing non-foaming warm-mix additives[J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(6): 1612-1633.
- [14] WEN Y, WANG Y H, ZHAO K C, et al. The engineering, economic, and environmental performance of terminal blend rubberized asphalt binders with wax-based warm mix additives[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184: 985-1001.
- [15] BOULDIN M G, DONGRÉ R, D'ANGELO J. Proposed refinement of superpave high-temperature specification parameter for performance-graded binders[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1766(1): 40-47.