

文章编号:1672-9331(2021)01-0033-07

# 温拌高模量沥青混合料性能试验研究

陈安京

(南京市城市道路管理中心,江苏 南京 210000)

**摘要:** 针对沥青路面的车辙病害以及热拌施工产生的环境污染问题,设计出了一种温拌高模量沥青混合料。通过黏度试验、软化点试验以及延度试验分析了两种温拌剂的适用性;通过车辙试验、低温小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验对高模量沥青混凝土的路用性能进行了研究;开展了热拌和温拌两种工艺的对照试验,对比分析了温拌工艺对高模量沥青混凝土路用性能的影响。结果表明:有机蜡类温拌剂能够提高 SBS 沥青的软化点以及 60 ℃ 旋转黏度,但对于 5 ℃ 延度有不利影响;有机蜡类温拌沥青混合料 HMAC-13 的动稳定度比热拌沥青混合料 HMAC-13 的稍有降低,但降幅不大;有机蜡类温拌沥青混合料 HMAC-13 的抗弯拉强度和劲度模量比热拌沥青混合料 HMAC-13 的高,但其极限破坏应变略小于热拌沥青混合料 HMAC-13 的;有机蜡类温拌沥青混合料 HMAC-13 浸水马歇尔残留强度以及冻融劈裂强度均大于热拌沥青混合料 HMAC-13 的,表明其水稳定性优于传统热拌沥青混合料 HMAC-13 的。

**关键词:** 车辙;高模量;沥青混凝土;温拌;路用性能

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

## Experimental research on the performance of warm mix high-modulus asphalt mixture

CHEN An-jing

(Urban Road Management Center of Nanjing, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** In order to solve the rutting disease of the asphalt pavement and the environmental pollution caused by the hot mix construction, a warm mix high-modulus asphalt mixture was designed. The applicability of the two kinds of warm mixers was analyzed by viscosity test, softening point test and ductility test. The pavement performance of high-modulus asphalt concrete was studied through rutting test, low-temperature beam bending test, immersion Marshall test and freeze-thaw splitting test. A contrast test of hot mix and warm mix technique was carried out to compare and analyze the effect of warm mix technique on the pavement performance of high-modulus asphalt concrete. The results show that the organic wax warm mix agent can increase the softening point and 60 ℃ rotary viscosity of SBS asphalt, but it has an adverse effect on the ductility at 5 ℃. The dynamic stability of the organic wax warm mix asphalt mixture HMAC-13 is slightly lower compared with that of the hot mix asphalt mixture HMAC-13, but the decrease is not significant. The flexural tensile

收稿日期:2020-11-15

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20180113, BK20181112)

通讯作者:陈安京(1980—),男,高级工程师,主要从事城市道路桥梁管理等方面的研究工作。

E-mail:1924983621@qq.com

strength and stiffness modulus of the organic wax warm mix asphalt mixture HMAC-13 are higher than that of the hot mix asphalt mixture HMAC-13, but its ultimate failure strain is slightly smaller than that of the hot mix asphalt mixture HMAC-13. The immersion Marshall residual strength and freeze-thaw splitting strength of the organic wax warm mix asphalt mixture HMAC-13 are higher than that of the hot mix asphalt mixture HMAC-13, indicating that the organic wax warm mix asphalt mixture HMAC-13 has better water stability.

**Key words:** rutting; high modulus; asphalt concrete; warm mix; pavement performance

近年来,由于车辆超载、渠化交通等问题,以及沥青路面本身高温性能存在的缺陷,车辙、推移等路面病害逐渐增多。2018 年,交通运输部发布了《公路水运品质工程评价标准(试行)》,提出将长寿命、耐久性作为路面建设考核评估的主要指标,以有效解决因超载重载、渠化交通等引起的车辙等路面病害问题,并使路面长寿耐久逐渐成为道路建设的重要目标<sup>[1-2]</sup>。

采用高模量沥青混凝土(high modulus asphalt concrete,HMAC)提高路面的整体刚度,从而使沥青路面的高温稳定性得到改善,这一方法被世界各国广泛采用<sup>[3-4]</sup>。Espersson<sup>[5]</sup>将高模量沥青混凝土应用于机场道面,其在满足机场道面抗车辙性能要求的同时,也能减少路面基层厚度。Sybilski 等<sup>[6]</sup>将高模量沥青与石灰石集料相结合,发现其抗车辙性能、抗疲劳性能均优于传统沥青路面。高语<sup>[7]</sup>设计了一种 SBR 改性高模量沥青混合料,提高了混合料的抗冻性及耐久性。大量的工程实践证明,高模量沥青混凝土能有效解决沥青路面的车辙问题,使用高模量沥青混凝土铺设路面已逐渐成为应对车辙病害的主要手段之一。

高模量沥青混凝土的储存温度一般不低于 170℃,摊铺温度不低于 160℃<sup>[8]</sup>。因此,高模量沥青混凝土的施工需消耗大量能源,这与国家倡导的节能环保、绿色交通的理念相违背,也不符合可持续发展的要求<sup>[9-11]</sup>。此外,较高的施工温度更易使其产生有毒有害气体,当在隧道等狭窄封闭的空间进行道路施工时,对空气的污染较为严重,极易损害现场一线人员的健康。基于此,本研究依托苏锡常南部高速公路太湖隧道工程,在比选了几种温拌剂的基础上,采用温拌技术制备温拌高模量沥青混合料,力求在保证混合料良好路用性能的同时,能够降低施工温度,从而达到节能环保的要求。

## 1 温拌剂的优选

### 1.1 试验材料

沥青采用市售的成品 SBS 改性沥青,其技术指标见表 1。温拌剂采用江苏中路交通科学技术有限公司生产的有机蜡类温拌剂 Sasobit 和表面活性类温拌剂 Evotherm,其技术指标见表 2。

表 1 SBS 改性沥青技术指标

Table 1 Technical indexes of SBS modified asphalt

技术指标	实测值
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	55.2
软化点/℃	87.5
5℃延度/cm	30
60℃旋转黏度/(Pa·s)	6 002
135℃旋转黏度/(Pa·s)	2.2

表 2 温拌剂技术指标

Table 2 Technical indexes of warm mix agent

技术指标	温拌剂	
	有机蜡类	表面活性类
密度(20℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	实测	实测
外观	淡黄色小颗粒	白色小颗粒
气味	无味	无味
熔点/℃	110~120	130~135
闪点/℃	≥250	≥270

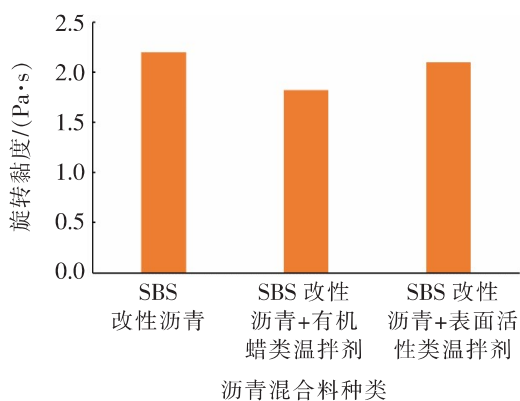
### 1.2 试验方案

将两种温拌剂分别加入 SBS 改性沥青中,有机蜡类温拌剂的掺量为 4%,表面活性类温拌剂掺量为 10%。对混合后的两种胶结料进行旋转黏度试验、软化点试验、延度试验及旋转薄膜烘箱试验,并根据两种温拌剂对沥青性能产生的影响选出最佳温拌剂。

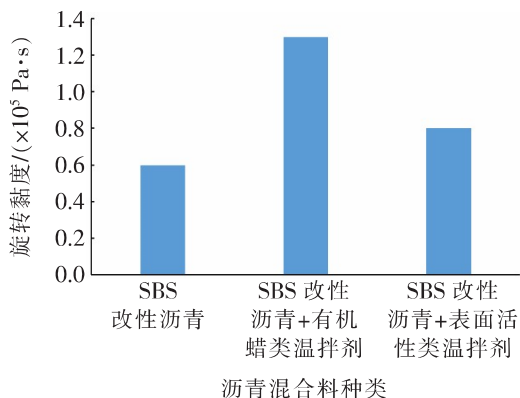
### 1.3 结果分析

#### 1.3.1 旋转黏度

135 ℃ 旋转黏度可以反映沥青混合料的施工和易性。在美国公路战略研究计划 (strategic highway research program, SHRP) 沥青结合料路用性能规范中提出了 135 ℃ 旋转黏度不得超过  $3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  的技术要求,以控制改性沥青的施工和易性。当路面温度达到 60 ℃ 时,可以反映夏季路面的高温状况。因此,60 ℃ 旋转黏度也应作为参考指标。对掺入两种温拌剂的沥青进行布氏旋转黏度试验,结果如图 1 所示。



(a) 135 ℃ 旋转黏度



(b) 60 ℃ 旋转黏度

图 1 布氏旋转黏度试验结果

Fig. 1 Results of Brookfield rotary viscosity test

由图 1 可知,与 SBS 改性沥青相比,在分别加入两种温拌剂后,沥青的 135 ℃ 旋转黏度均有所降低,其中在加入表面活性类温拌剂后 SBS 改性沥青的旋转黏度降低得不明显;而沥青的 60 ℃ 旋转黏度均出现了不同程度的增大,其中在加入有机蜡类温拌剂后 SBS 改性沥青的旋转黏度增大明显,这表明有机蜡类温拌剂能够显著改善沥青胶结料的高温抗变形能力。

结合两种温拌剂的机理对上述试验结果进行分析。有机蜡类温拌剂通过降低胶结料的黏度来

降低沥青混合料的拌和温度<sup>[12-13]</sup>,而表面活性类温拌剂通过乳化液中水分子的蒸发发泡作用来满足拌和要求<sup>[14-15]</sup>。在试验过程中,由于在添加表面活性类温拌剂后沥青有发泡现象发生,无法直接进行旋转黏度试验。此时,需先将添加表面活性类温拌剂的沥青进行恒温保存,待沥青稳定后再进行黏度试验,而在此过程中沥青已发生了一定程度的老化。

#### 1.3.2 软化点

软化点反映了胶结料的高温稳定性,软化点越高表明胶结料的高温性能越好。对掺入两种温拌剂的沥青进行软化点试验,结果如图 2 所示。

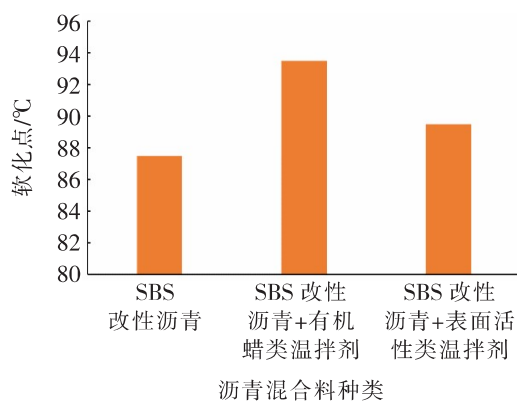


图 2 软化点试验结果

Fig. 2 Results of softening point test

由图 2 可知,与 SBS 改性沥青相比,在加入有机蜡类温拌剂后,沥青软化点有所增高,而表面活性类温拌剂对软化点的影响不明显。现有的相关研究表明,软化点可以定性地反映沥青的高温性能。因此,根据上述试验结果可以认为有机蜡类温拌剂能较明显地提高沥青的高温性能。

#### 1.3.3 延度

5 ℃ 延度作为评价沥青低温性能的指标,在一定程度上反映了沥青的温度敏感性。对掺加两种温拌剂的沥青进行延度试验,加载速率为 1 cm/min,试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,在掺加有机蜡类温拌剂后,沥青混合料的 5 ℃ 延度略有降低;在掺加表面活性类温拌剂后,沥青的 5 ℃ 延度略有增加。这说明有机蜡类温拌剂对沥青的低温性能会产生负面影响,但近年来工程界对延度指标与沥青低温性能的相关性有所质疑<sup>[16]</sup>。目前普遍通过低温小梁弯曲试验,根据劲度模量和蠕变速率来评价沥青的低温性能。

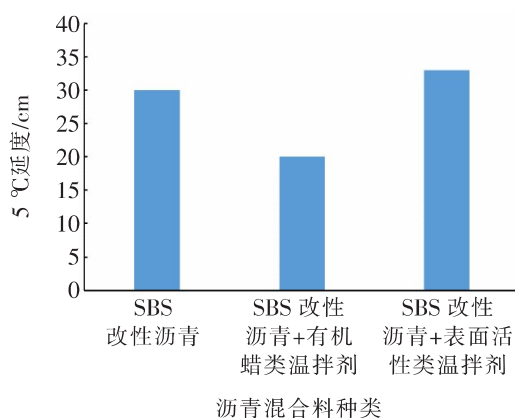


图3 延度试验结果

Fig. 3 Results of ductility test

## 2 混合料性能研究

### 2.1 集料

集料选用石质坚硬、清洁、不含风化颗粒的兴源玄武岩碎石,其技术指标见表3。

表3 集料的技术指标

Table 3 Aggregate technical indexes

技术指标	实测值
表观相对密度	2.954
毛体积相对密度	2.895
吸水率/%	0.71

### 2.2 配合比设计

参考法国沥青混合料设计指南 *LPC Bituminous Mixtures Design Guide*, 在规定级配范围内优选一个级配, 对该级配的混合料试件进行旋转压实试验, 确定其压实特性。采用 30# 硬质沥青作为高模量沥青胶结料进行沥青混合料的配合比设计。通过丰度系数  $K$  确定油石比的初始值, 要求  $K > 3.4$ 。  $K$  可由下式计算:

$$K = \frac{T}{\alpha \sqrt[5]{(0.25G + 2.3S + 12s + 135f)/100}} \quad (1)$$

式中:  $T$  为油石比, %;  $G$  为粒径大于 6.3 mm 的集料占总集料的质量百分比, %;  $S$  为粒径 0.25~6.3 mm 的集料占总集料的质量百分比, %;  $s$  为粒径 0.063~0.25 mm 的集料占总集料的质量百分比, %;  $f$  为粒径小于 0.063 mm 的集料占总集料的质量百分比, %;  $\alpha = 2.65/\rho_G$ , 其中  $\rho_G$  为集料

的有效密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

在初步选定级配及油石比后, 对沥青混合料试件进行旋转压实试验, 得到其动态模量和孔隙率。若两者满足技术要求, 则进行下一步最佳油石比的确定; 否则, 需重新优选级配及初定油石比。经数次微调之后, 将油石比确定为 5.5%。沥青混合料 HMAC-13 的级配设计见表 4。

表4 沥青混合料 HMAC-13 的设计级配

Table 4 Design gradation of asphalt mixture HMAC-13

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
16.0	100.0	1.18	22.1
13.2	94.9	0.6	15.6
9.5	79.0	0.3	11.4
4.75	41.8	0.15	9.1
2.36	31.3	0.075	7.6

### 2.3 性能试验

根据确定的设计级配成型 HMAC 试件, 采用有机蜡类温拌剂对 HMAC 混合料进行改性, 成型普通沥青混合料 HMAC-13 以及温拌沥青混合料 HMAC-13 试件。通过车辙试验、小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验对比研究温拌高模量沥青混合料 HMAC-13 的路用性能。

#### 2.3.1 高温性能

高温稳定性是指混合料在高温情况下, 在承受外力的不断作用时抵抗永久变形的能力。高温稳定性是评价沥青混合料耐久性的重要指标。隧道由于所处环境的特殊性, 对路面的平整度要求极高。车辙病害破坏了路面的平整度, 极大地影响了行车安全。太湖隧道通车后交通量将会很大, 因此对抗车辙性能要求较高。对两种 HMAC 沥青混合料进行车辙试验, 结果如图 4 所示。

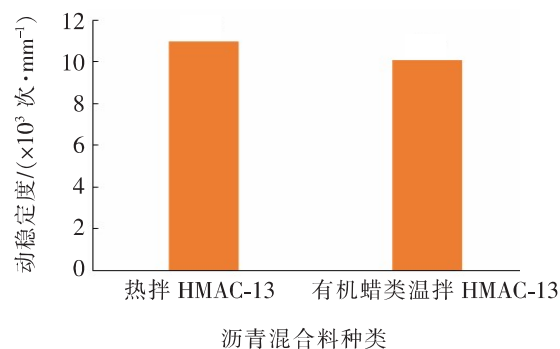


图4 车辙试验结果

Fig. 4 Results of rutting test

由图 4 可知,热拌高模量沥青混合料 HMAC-13 的动稳定度达到了 11 052 次/mm。在采用有机蜡类温拌剂后动稳定度稍有降低,为 10 161 次/mm,仅降低了 891 次/mm,降幅约 8%。由此可见,有机蜡类温拌剂对沥青混合料 HMAC-13 的高温性能有一定的负面影响,但总的来说影响不大。

### 2.3.2 低温性能

低温性能是指混合料在低温条件下抵抗开裂的能力。根据前期调研,太湖隧道内的年平均气温为 10~15℃,故其对低温抗裂性能有一定的要求。因此,对有无温拌剂的两种沥青混合料试件进行小梁弯曲试验,试验温度为 15℃,加载速率为 50 mm/min,试验结果如图 5 所示。

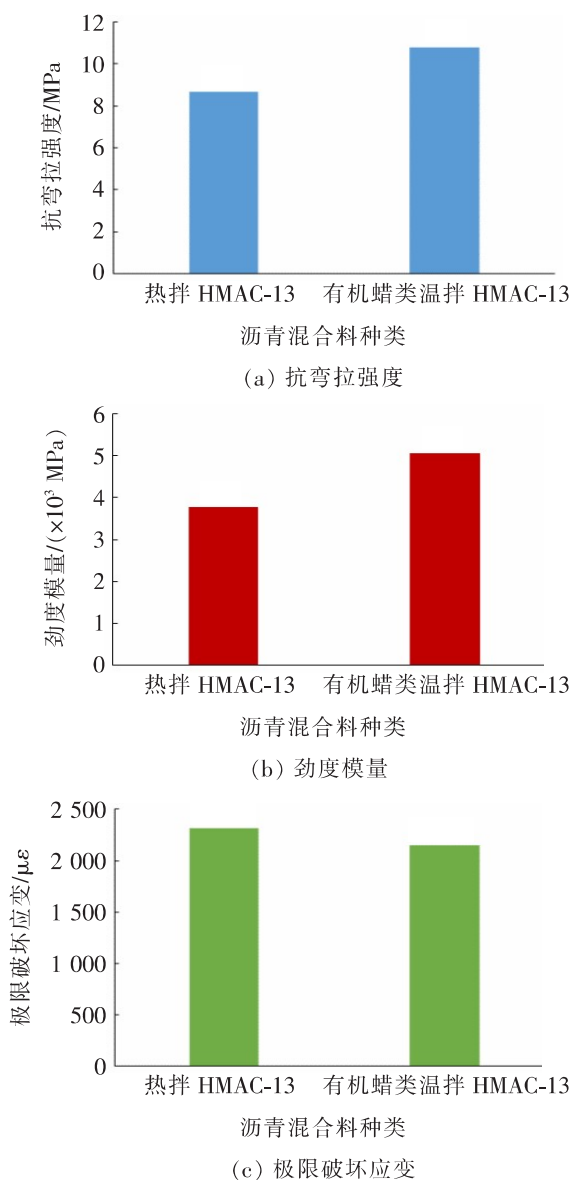


图 5 小梁弯曲试验结果

Fig. 5 Results of beam bending test

由图 5 可知,与热拌沥青混合料 HMAC-13 相比,有机蜡类温拌沥青混合料 HMAC-13 的抗弯拉强度和劲度模量均有所增大,而破坏应变则出现了小幅减小。其中,抗弯拉强度增大了 2.134 MPa,增幅约 25%;劲度模量增大了 1 290 MPa,增幅约 34%;极限破坏应变减小了 160  $\mu\epsilon$ ,降幅约 7%。由此可见,与热拌沥青混合料 HMAC-13 相比,有机蜡类温拌沥青混合料 HMAC-13 的低温抗裂性能有一定程度的提高。

### 2.3.3 水稳定性

路面在荷载、雨水等的作用下,水分进入混合料的孔隙,将降低集料与沥青间的黏结力。太湖隧道内部环境湿度较大,前期调研显示,一年中有 5 个月平均湿度在 90%以上。同时隧道渗水也是一个不可忽视的问题。这些都对沥青混合料的水稳定性提出了较高的要求。通过对两种沥青混合料试件进行浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验来评价其水稳定性,试验结果如图 6 所示。

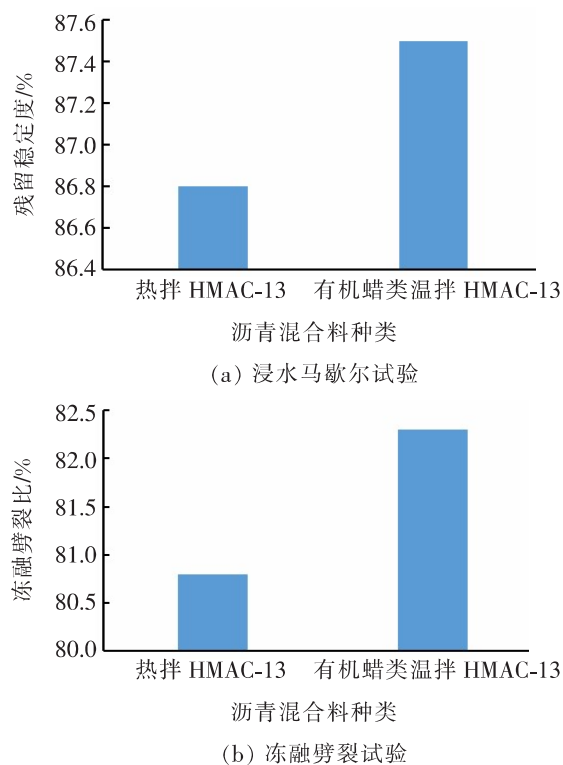


图 6 水稳定性试验结果

Fig. 6 Results of water stability test

由图 6 可知,热拌沥青混合料 HMAC-13 的浸水马歇尔残留稳定度为 86.8%,冻融劈裂比为 80.8%;有机蜡类温拌沥青混合料 HMAC-13 的浸水马歇尔残留稳定度为 87.5%,与热拌沥青混合料 HMAC-13 相比提高了 0.7%;冻融劈裂比为

82.3%,与热拌沥青混合料 HMAC-13 相比提高了 1.5%。由此可见,有机蜡类温拌沥青混合料 HMAC-13 的水稳定性比热拌沥青混合料 HMAC-13 的更好,其抵抗水损害能力更强。

### 3 结论

本研究依托苏锡常南部高速公路太湖隧道工程,针对沥青路面的车辙病害以及热拌施工存在的弊端,设计了一种温拌高模量沥青混合料,并进行了相关性能试验研究。结果表明:与传统热拌沥青混合料 HMAC-13 相比,温拌高模量沥青混合料 HMAC-13 的性能更优异,能够满足隧道铺装下面层的使用要求。具体结论如下:

1) 有机蜡类温拌剂能够提高沥青的软化点以及 60 °C 旋转黏度,在一定程度上改善了沥青的高温性能;同时降低了 135 °C 旋转黏度,有利于提高施工和易性。

2) 与热拌沥青混合料 HMAC-13 相比,有机蜡类温拌沥青混合料 HMAC-13 的抗弯拉强度及劲度模量均有一定程度的提高,表明其低温性能比传统的热拌高模量沥青混合料的要好。

3) 有机蜡类温拌沥青混合料 HMAC-13 的浸水马歇尔残留稳定度及冻融劈裂比均比热拌沥青混合料 HMAC-13 的大,表明其具有良好的水稳定性。

### 〔参考文献〕

[1] 王朝辉,舒诚,韩冰,等.高模量沥青混凝土研究进展[J].长安大学学报:自然科学版,2020,40(1):1-15.  
WANG Zhao-hui, SHU Cheng, HAN Bing, et al. Research progress of high modulus asphalt concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40(1): 1-15.

[2] 高国华,黄卫东,白玉铎.环保型高模量沥青混合料性能试验研究[J].公路工程,2017,42(5):18-21,31.  
GAO Guo-hua, HUANG Wei-dong, BAI Yu-duo. Research on performance of environment-friendly high modulus asphalt mixture [J]. Highway Engineering, 2017, 42(5): 18-21, 31.

[3] 李帆.高模量沥青混合料在公路工程中的应用[J].交通世界,2020(26):31-32.  
LI Fan. Application of high modulus asphalt mixture

in highway engineering [J]. Transpoworld, 2020(26): 31-32.

[4] 周庆华,沙爱民.高模量沥青混凝土路面永久变形[J].长安大学学报:自然科学版,2013,33(5):13-16,22.  
ZHOU Qing-hua, SHA Ai-min. Permanent deformation of high modulus asphalt concrete pavement [J]. Journal of Chang'an University: Science and Technology, 2013, 33(5): 13-16, 22.

[5] Espersson M. Effect in the high modulus asphalt concrete with the temperature [J]. Construction and Building Materials, 2014, 70: 638-643.

[6] Sybilski D, Bańkowski W, Krajewski M. High modulus asphalt concrete with limestone aggregate [J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2010, 3(2): 96-101.

[7] 高语.季冻区高模量剂 SBR 复合改性沥青混合料耐久性研究[D].兰州:兰州交通大学,2020:49-54.  
GAO Yu. Research on durability of high modulus agent SBR composite modified asphalt mixture in seasonal frozen area [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Communication, 2020: 49-54.

[8] 钱喜红,关永胜,臧国帅,等.高模量沥青混合料技术路径与合理评价指标应用研究[J].公路,2020,65(1):231-238.  
QIAN Xi-hong, GUAN Yong-sheng, ZANG Guo-shuai, et al. Application research on technical path and reasonable evaluation index of high modulus asphalt mixture [J]. Highway, 2020, 65(1): 231-238.

[9] 江成.贯彻可持续发展理念构建绿色交通运输体系 [N].中国交通报,2020-07-01(2).  
JIANG Cheng. Carry out the concept of sustainable development and build a green transportation system [N]. China Communications News, 2020-07-01(2).

[10] 吕玉超,张美玉,张玉贞.温拌沥青混合料发展现状[J].石油沥青,2013,27(5):1-6.  
LYU Yu-chao, ZHANG Mei-yu, ZHANG Yu-zhen. Development of warm mix asphalt mixture [J]. Petroleum Asphalt, 2013, 27(5): 1-6.

[11] 周志刚,陈功鸿,张红波,等.胶粉/高黏剂复合改性 SBS 沥青的性能与改性机理[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2020,17(2):1-9.  
ZHOU Zhi-gang, CHEN Gong-hong, ZHANG Hong-bo, et al. Performance and modification mechanism of SBS modified asphalt by rubber powder/high viscosity agent [J]. Journal of Changsha Uni-

- versity of Science & Technology: Natural Science, 2020, 17(2): 1-9.
- [12] 刘晓薇. 基于 HP-GPC 的温拌改性沥青老化特性研究[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 287-292.
- LIU Xiao-wei. Study on aging characteristics of warm mix modified asphalt based on HP-GPC[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(5): 287-292.
- [13] 黄维蓉, 杨玉柱, 杨东来, 等. 降黏型与表面改性型温拌剂对沥青混合料性能的影响[J]. 公路与汽运, 2020(6): 57-60.
- HUANG Wei-rong, YANG Yu-zhu, YANG Dong-lai, et al. Influence of viscosity reducing and surface modified warm mixture on asphalt mixture performance[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(6): 57-60.
- [14] 黄绍龙, 卞周宏, 金帆, 等. 三种沥青温拌剂降黏机理分析[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2017, 39(5): 506-510.
- HUANG Shao-long, BIAN Zhou-hong, JIN Fan, et al. Analysis of viscosity reduction mechanism of three asphalt warm mixing agents[J]. Journal of Hubei University: Natural Science, 2017, 39(5): 506-510.
- [15] 陈四来, 延西利, 李鹏, 等. 沥青和沥青胶浆的黏弹性特性[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(3): 12-17.
- CHEN Si-lai, YAN Xi-li, LI Peng, et al. Viscoelastic properties of asphalt and asphalt binder[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3): 12-17.
- [16] 黄卫东, 傅星恺, 李彦伟, 等. SBS 类改性沥青低温性能评价及指标相关性分析[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3): 456-463.
- HUANG Wei-dong, FU Xing-kai, LI Yan-wei, et al. Low temperature performance evaluation and index analysis of SBS modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3): 456-463.
- 
- (上接第 6 页)
- [9] 刘艳萍. 橡胶封装 FBG 沥青路面竖向应变传感器的开发与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 57-58.
- LIU Yan-ping. Development and research on rubber encapsulated FBG asphalt pavement vertical strain sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 57-58.
- [10] 赵逸宁. 利用光纤光栅技术监测沥青路面温度与应力场[D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 48-51.
- ZHAO Yi-ning. Monitoring temperature and stress field of asphalt pavement using fiber Bragg grating technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018: 48-51.
- [11] 解建光, 刘树龙. 环氧树脂掺加增韧剂埋入式 FBG 封装技术研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(3): 22-24.
- XIE Jian-guang, LIU Shu-long. Study on embedded FBG packaging technology with epoxy resin and toughening agent[J]. Sensors and Microsystems, 2011, 30(3): 22-24.
- [12] 解建光, 王秋桐, 刘树龙, 等. 光纤 Bragg 光栅监测沥青混凝土应变试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(3): 17-20, 50.
- XIE Jian-guang, WANG Qiu-tong, LIU Shu-long, et al. Fiber Bragg grating monitoring strain test of asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(3): 17-20, 50.
- [13] 曹卫锋. 车辆动载作用下长大上坡沥青路面力学响应研究[D]. 西安: 长安大学, 2014: 89-92.
- CAO Wei-feng. Research on mechanical response of long-uphill asphalt pavement under vehicle dynamic load[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014: 89-92.
- [14] 梁晓龙. 半刚性基层沥青路面加速加载 (MLS) 试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2019: 37-41.
- LIANG Xiao-long. Research on accelerated pavement test (MLS) for semi-rigid base asphalt pavement[D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 37-41.
- [15] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20-2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [16] 马宪永. 随机荷载作用下沥青路面力学响应理论求解与监测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 6-14.
- MA Xian-yong. Analytical solution and monitoring method of mechanical response of asphalt pavement to random load [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 6-14.