

基于加速加载试验的温拌沥青混合料 长期性能研究

王 春¹, 郝培文¹, 张喜艳²

(1. 长安大学道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 西安西北民航项目管理有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要 目的 研究分别添加 Aspha-min、Sasobit 和 DAT 温拌剂的 3 种温拌沥青混合料(WMA)长期使用性能。方法 对 3 种温拌沥青混合料的使用性能进行了常规性能试验和 MMLS3 加速加载试验,并采用基于车辙试验的沥青路面车辙深度预估方法对 WMA 的长期抗车辙性能进行评估。结果 3 种 WMA 使用性能基本可以达到热拌沥青混合料(HMA)的技术水平,但添加 Aspha-min 和 Sasobit 后混合料的水稳定性较差,在多雨地区尤其是多雨寒冷地区使用时应采取一定改善措施;MMLS3 加速加载试验表明沥青混合料的车辙变形存在两个阶段:迅速增大的压密阶段和稳定增加的蠕变阶段,且车辙深度与加载次数呈良好的对数关系,而回归系数 a 则可以较好地表征沥青混合料的抗车辙性能;采用 MMLS3 加速加载试验评价沥青混合料高温抗车辙性能时标准试验加载次数可以选择 20~30 万次。结论 在添加温拌剂后沥青混合料的抗车辙性能以及抗疲劳性能基本都能达到甚至超过热拌沥青混合料的技术水平。

关键词 道路工程;温拌沥青混合料;加速加载试验;长期性能

中图分类号 TU528;U414

文献标志码 A

Study on the Long-term Performance of Warm Mix Asphalt by Accelerated Loading Test

WANG Chun¹, HAO Peiwen¹, ZHANG Xiyan²

(1. Key Laboratory for Road Structure and Materials of Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an, China, 710064; 2. Xi'an Northwest Civil Aviation Project Management Co. Ltd., Xi'an, China, 710075)

Abstract: The purpose of this paper is to study the long-term performance of warm mix asphalt mixture which added with Alpha-min, Sasobit and DAT respectively. The routine performance tests and MMLS3 accelerated loading test were used to evaluate the pavement performance of three

收稿日期:2020-05-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51978073)

作者简介:王春(1984—),男,博士,主要从事路面结构与材料方面研究。

kinds of warm mix asphalt mixture (WMA), and the long-term rutting resistance of WMA was estimated by rutting depth prediction method based on rutting test. The results show that the performances of the three WMA could basically reach the technical level of HMA. However the water stability of WMA is poor after adding Alpha-min and Sasobit, so some improvement measures should be taken when it is used in rainy areas, especially in rainy and cold areas. It's found that there are two stages of rutting deformation curve of asphalt mixture: the rapid increase of compaction stage and the steady increase of creep stage, by MMLS3 accelerated loading test. And the rutting depth has a good logarithmic relationship with the number of loading times, while the regression coefficient "a" could better represent the rutting resistance of asphalt mixture. When MMLS3 accelerated loading test is used to evaluate the rutting resistance of asphalt mixture, the standard loading times can be selected as 200 000-300 000 times. In general, the rutting resistance and fatigue resistance of WMA can basically reach or even exceed the technical level of HMA.

Key words: road engineering; warm mix asphalt; accelerated loading test; long-term performance

温拌沥青混合料(WMA)虽然已经发展了10多年,但与传统的热拌沥青混合料(HMA)相比,仍为新技术^[1]。由于集料加热温度低水分难以充分烘干,使WMA存在潜在的水损害威胁^[2-6],而且不同温拌技术由于机理不同,以致其对混合料高温、低温、水稳等路用性能的影响也略有不同,Sasobit可以提高WMA的高温稳定性,但对WMA低温性能不利^[7],而Aspha-min则对WMA的低温性能、水稳定性都有不利影响^[8]。总体而言,各种WMA的路用性能基本都可以达到HMA的技术水平^[9-15]。然而由于试验室试验条件与实际路面使用状况存在差异,以致很多研究结果并不能完全准确反映实际工程情况。而目前铺筑的温拌试验段使用年限仍较短,仅有10余年,能否准确反映温拌技术的实际状况仍有待验证。20世纪90年代,挪威、德国相关部门对其境内铺筑的部分WMA试验段进行了调查,结果表明其性能与HMA相当,有些甚至要稍好,但采用Sasobit等蜡基有机温拌剂会影响沥青的低温性能^[16-17];而法国经过大量的室内和现场试验研究发现WMA只有水稳定性能稍差于HMA^[18]。由挪威、德国等国家的调查结果可以发现,WMA在3年左右的短期使用性能均能达到甚至超过HMA的水平。美国NCAT对Evotherm WMA的环道试验表明,

WMA具有与HMA相同的抗车辙性能,在经过50万次标准轴载作用后,WMA与HMA试验段的车辙深度都没有超过1.1 mm^[19]。NCAT“NCHRP 9-47A”项目对美国各州包括轻重交通及不同气候区域的WMA路面试验段在使用1~5a后进行了调查,WMA路面整体使用状况良好,基本与HMA相同^[20]。加拿大学者对其境内的3条Evotherm试验段研究发现,Evotherm WMA路面与HMA路面基本一样^[21]。到目前为止,美国的研究结果还没发现WMA长期使用性能中的缺陷^[22],而欧洲的研究也表明WMA的长期性能与HMA基本一致甚至好于HMA^[23]。美国的研究是由政府部门进行的,而欧洲的研究则是由温拌技术研发公司进行的。我国交通运输部公路科学研究院于2008年对北京、上海、浙江等8个省市铺筑的18条已运营1~3a的Evotherm试验段进行调查,各WMA路面使用状况良好,具有与HMA相同的使用性能^[24]。采用WMA铺筑的试验路段在短期内均表现出了良好的使用性能,达到了同条件下HMA的水平,但由于使用时间短,或者跟踪观测资料有限,导致对其长期性能的认识仍有一定局限。笔者采用MMLS3加速加载试验对3种典型的温拌沥青混合料长期性能进行探讨,3种温拌沥青混合料基本能达到甚至超过热拌沥青混合料

的技术水平.

1 试 验

1.1 试验材料

(1)原材料与级配.采用角闪岩作为粗、细集料,集料密度如表1所示.石灰岩作为矿粉,表观相对密度为2.744.沥青为SBS改性沥青,技术指标如表2所示.选取Aspha-min,Sasobit和Evotherm DAT 3种比较典型的温拌剂,技术指标如表3所示.采用AC-13级配,按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的规定合成级配(见

表4).

表 1 集料密度
Table 1 Density of aggregates

粒径/mm	表观相对密度	毛体积相对密度
11~16	2.945	2.915
7~11	2.940	2.906
4~11	2.936	2.895
0~4	2.800	—

表 2 沥青技术指标
Table 2 Technical specification of asphalt

25℃针入度/0.1mm	软化点/℃	5℃延度/cm
59.8	83.3	46.1

表 3 温拌剂技术指标
Table 3 Technical specification of warm mix agent

温拌剂种类	用量与用法
Aspha-Min	掺量一般为混合料质量的0.3%,与沥青同时加入集料,不需要延长拌和时间
Sasobit	掺量一般为沥青结合料质量的1%~3%,可采取干法或湿法添加,需要适当增加干拌时间.选择1.5%的掺量,采取干法添加
EvothermDAT	掺量在室内试验时为沥青结合料质量的1/9,在施工时为沥青结合料质量的1/19,添加时应与沥青同步,并直接喷射到沥青上,以保证发泡效果

表 4 AC-13 沥青混合料合成级配
Table 4 Gradation of AC-13

筛孔尺寸/mm	通过率/%
16	100
13.2	97.0
9.5	79.3
4.75	49.4
2.36	39.9
1.18	29.4
0.6	19.6
0.3	13.1
0.15	10.4
0.075	7.9

表 5 AC-13 热拌改性沥青混合料最佳油石比
Table 5 The optimum asphalt content of AC-13 HMA

最佳油石比/%	毛体积相对密度	空隙率/%	矿料间空隙率/%	沥青饱和度/%
4.5	2.559	4.0	14.2	71.8

1.2 混合料常规性能试验与MMLS3加速加载试验

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)规定的残留稳定度试验、冻融劈裂试验、车辙试验、低温弯曲试验,对1种HMA与3种WMA共4种沥青混合料在最佳油石比4.5%下的水稳定性、高温稳定性、低温抗裂性能进行了检测,试验结果如表6所示.

(2)最佳油石比.通过马歇尔试验确定热拌改性沥青混合料最佳油石比(见表5).温拌沥青混合料采用与热拌沥青混合料相同的油石比进行性能验证.HMA的最佳拌和温度取180℃,最佳压实温度取160℃,WMA的最佳拌和温度取160℃,最佳压实温度取140℃.

采用MMLS3加速加载试验对WMA的车辙和疲劳等长期性能进行研究.MMLS3是南非研发的足尺加速加载设备MLS10的1/3大小的加速加载设备(见图1).在实际路面或试验室内均可进行试验,能够模拟路面不同干湿条件和温度条件^[25-26].

表 6 HMA 与 WMA 路用性能检测结果

Table 6 The pavement performances test results of HMA and WMA				
混合料类型	浸水残留稳定度/%	冻融劈裂强度比/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	最大破坏弯拉应变/10 ⁻⁶
HMA	96.4	94.8	4 689	6 253
Aspha-min WMA	100.9	69.7	4 525	5 930
Sasobit WMA	96.4	83.5	4 508	6 207
EvothermDAT WMA	96.2	85.7	4 523	5 304



图 1 MMLS3 试验设备

Fig. 1 MMLS3 test equipment

制备 Φ150 mm 的试件(见图 2),再按试件尺寸要求将其切割后装在试验槽中,允许试件厚度为 25 ~ 100 mm.

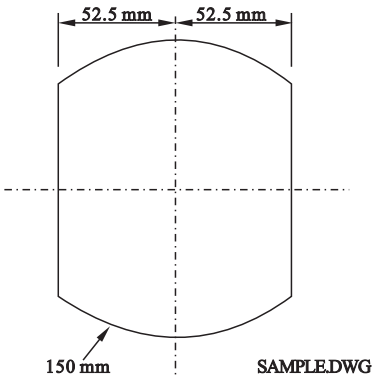


图 2 试验试件

Fig. 2 Specimen

MMLS3 通过 4 个直径为 30 cm 的单轮组充气轮胎对结构进行循环施加荷载,加载速度可达到 7 200 次/h,具体加载速率可通过电机频率调节. 轮胎的气压一般在 0.7 MPa 左右,最大不超过 0.8 MPa,最大轮重为 2.7 kN. 在实际操作中,通过设备顶部的 4 个角把手升降,从而调节轮胎与路面或试件的接触压力. 通过记录加载过程中不同加载次数时试件的车辙深度来评价混合料高温抗变形能力.

选择在干燥加热状态下进行加载,加载过程中试件通过试验槽底部的水循环加热系统进行加热,加热温度设定为 60 ℃,荷载模拟器的加载速率采用电机频率为 40 Hz,相当于加载次数 6 000 次/h,轮胎的气压为 0.7 MPa,轮重为 2.7 kN. 试件厚度选取 4 cm 和 5 cm 两种.

厚度 4 cm 的试件,加载约 1 万次时开始有明显辙痕出现,加载至约 20 万次时试件轮迹两侧开始出现轻微隆起现象,其中处在车轮行进方向最前端的试件隆起尤为明显,此后轮迹边缘逐渐出现裂缝,加载至 49 万次时试件底部均出现裂缝(见图 3),停止加载,加载过程中试件车辙变形如表 7 所示.

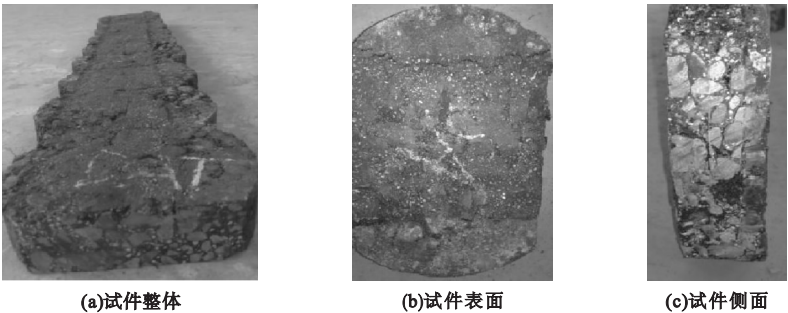


图 3 4 cm 试件加载 49 万次后状况

Fig. 3 Condition of 4 cm thick specimen after 490 000 times of loading

表7 4 cm 试件在加载过程中的车辙变形

Table 7 Rutting deformation of 4 cm thick specimen during loading

混合料类型	车辙深度/mm							
	5 万次	10 万次	15 万次	20 万次	25 万次	30 万次	35 万次	40 万次
HMA	1.63	1.77	1.84	1.89	—	1.95	—	2.04
Evotherm DAT WMA	1.67	1.74	1.77	1.86	1.83	1.91	1.96	1.95
Aspha-min WMA	1.30	1.38	1.46	1.56	1.61	1.53	1.64	1.63
Sasobit WMA	1.50	1.80	1.96	2.04	2.00	2.06	2.15	2.19

厚度 5 cm 的试件,采用相同的加载条件,加载至 55 万次时有试件底部开始出现微裂缝,继续加载至试件均出现裂缝(见图 4)

后停止,总加载次数为 69 万次,加载过程中试件车辙变形如表 8 所示。

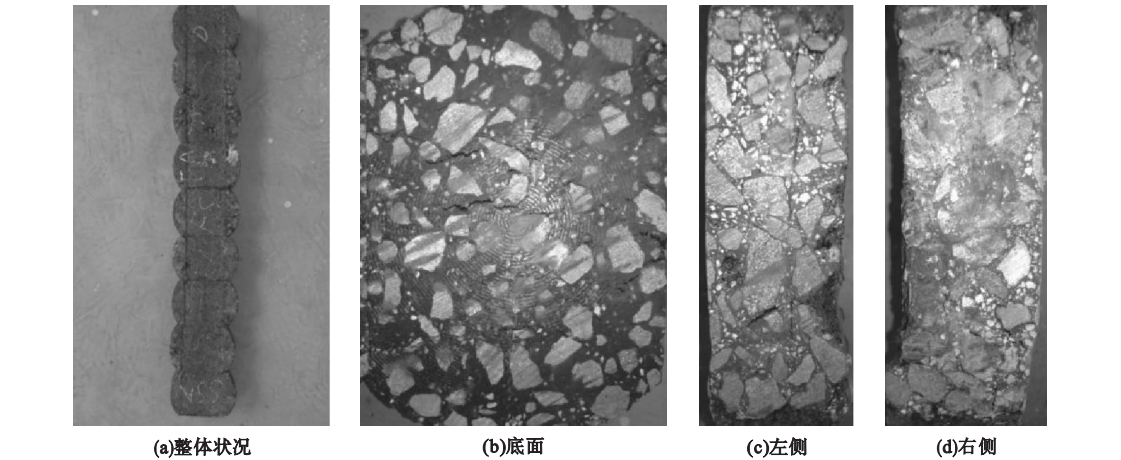


图4 5 cm 试件加热加载 69 万次后状况

Fig. 4 Condition of 5 cm thick specimen after 690 000 times of loading

表8 5 cm 试件在加载过程中的车辙变形

Table 8 Rutting deformation of 5 cm thick specimen during loading

混合料类型	车辙深度/mm							
	5 万次	10 万次	15 万次	20 万次	25 万次	30 万次	40 万次	50 万次
HMA	1.63	1.78	1.92	1.96	—	2.06	2.16	—
Evotherm DAT WMA	1.84	2.30	2.19	2.34	2.44	2.43	2.51	2.50
Aspha-min WMA	1.76	1.95	1.90	2.20	2.29	2.30	2.34	2.34
Sasobit WMA	1.77	1.89	2.09	2.06	2.16	2.21	2.25	2.35

1.3 车辙深度预估

1.3.1 车辙深度预估模型

通过对标准厚度的沥青混合料试件,在标准试验条件下进行车辙试验,根据试验结果,按沥青层设计厚度、所在地区有效温度、设计轴载和作用轴次分层计算永久变形量,通过累加后得到沥青路面结构车辙深度预估值^[27].该预估方法修正模型经 ALF 环道试验检验,其预估误差在 10% 左右.因此,利用

该车辙预估模型,对 4 种沥青混合料在一定轴载作用次数下的车辙深度进行预估。

$$R_D=0.188k_h\left(\frac{t}{t_0}\right)^{2.929}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{1.800}\left(\frac{\eta N}{N_0}\right)^{0.479}\times\left(\frac{v}{v_0}\right)^{0.828}r_{d0} \tag{1}$$

式中: R_D 为沥青分层的车辙深度,mm; k_h 为沥青层厚度影响系数; t 为沥青分层温度,℃; t_0 为车辙试验温度,℃; p 为沥青分层

承受的竖向压应力,MPa; p_0 为车辙试验轮压,MPa; η 为车道轮迹横向分布系数,取 0.50(高速公路)或 0.45(其他公路); N 为沥青分层承受的荷载作用次数; N_0 车辙试验荷载作用次数; v 为沥青分层空隙率,%; v_0 为车辙试验试件空隙率,%; r_{a0} 为标准条件下车辙试验的车辙深度,mm.

$$k_h = (c_1 + c_2 \times z)0.761^z. \tag{2}$$
式中: z 为沥青层分层的深度,对于第一层 z 取 1.5 cm,其他分层为该沥青层中点距沥青层表面的深度,cm; c_1 、 c_2 为系数.

$$c_1 = -0.016\ 1h_a^2 + 0.979h_a - 17.342. \tag{3}$$

表 9 加速加载试验参数

混合料类型	r_{a0}/mm		$t_0/^\circ\text{C}$	p_0/MPa	$N_0/\text{万次}$	$v_0/\%$
	4 cm 试件	5 cm 试件				
HMA	2.04	2.16	55	0.7	40	4.0
Evotherm DAT WMA	1.95	2.51	55	0.7	40	4.0
Aspha-min WMA	1.63	2.34	55	0.7	40	4.0
Sasobit WMA	2.19	2.25	55	0.7	40	4.0

表 10 车辙深度预估计算参数
Table 10 Parameters for rutting depth calculation

$t/^\circ\text{C}$	p/MPa	$N/\text{万次}$	$v/\%$
60	0.7	1 200	4.0

由于计算混合料位于上面层,故 $z = 1.5\text{ cm}$,假定沥青层厚度 h_a 为 20 cm,则按车辙深度预估模型式(1)可计算得到各混合料(单层)在设计轴载作用次数下的车辙深度如表 11 所示.

表 11 车辙深度预估结果
Table 11 Results of rutting depth estimation

试件厚度/mm	R_D/mm			
	HMA	Evotherm DAT WMA	Aspha-min WMA	Sasobit WMA
4	3.45	3.29	2.75	3.70
5	3.65	4.24	3.95	3.80

2 试验结果分析

2.1 常规性能试验结果分析

常规性能试验结果表明,分别添加 3 种

$$c_2 = 0.001\ 051h_a^2 + 0.268\ 6h_a + 10.798. \tag{4}$$
式中: h_a 为沥青层厚度,cm, h_a 大于 20 cm 时取 20 cm.

1.3.2 不同沥青混合料车辙预估结果

假定 4 种沥青混合料均用于沥青路面上面层,其环境温度为 60 ℃,交通轴载等级为 BZZ-100,设计轴载作用次数为 1200 万次,大约相当于普通高速公路 10 a 累计交通荷载作用次数,以加速加载试验 40 万次时车辙深度作为标准条件下车辙试验结果,则不同沥青混合料标准车辙试验条件如表 9 所示,车辙深度预估时沥青路面上面层各计算参数如表 10 所示.

温拌剂后 3 种温拌沥青混合料的各项性能除冻融劈裂强度比外,均可以达到热拌沥青混合料的水平,因此采用温拌技术时应采取一定措施增强其水稳定性能.

2.2 加速加载试验结果分析

沥青混合料的车辙深度与加载次数之间呈现良好的对数关系.

$$y = a \cdot \ln(x) + b. \tag{5}$$

式中: x 为试件加载次数,万次; y 为试件车辙深度,mm; a 、 b 为回归系数.

经回归拟合其曲线(见图 5)符合对数关系,各曲线回归系数如表 12 所示.从图 5 与表 12 可知,①WMA 的抗车辙性能并不一定比 HMA 差,甚至都能达到 HMA 的技术水平.②通过加速加载试验得到的车辙变形曲线明显存在两个阶段:迅速增大的压密阶段和稳定增加的蠕变阶段,同其他车辙试验所得曲线完全一致,即加载至一定次数后车辙变形达到稳定蠕变阶段,开始匀速发展,在这一阶段其大小同荷载作用次数呈线性增长

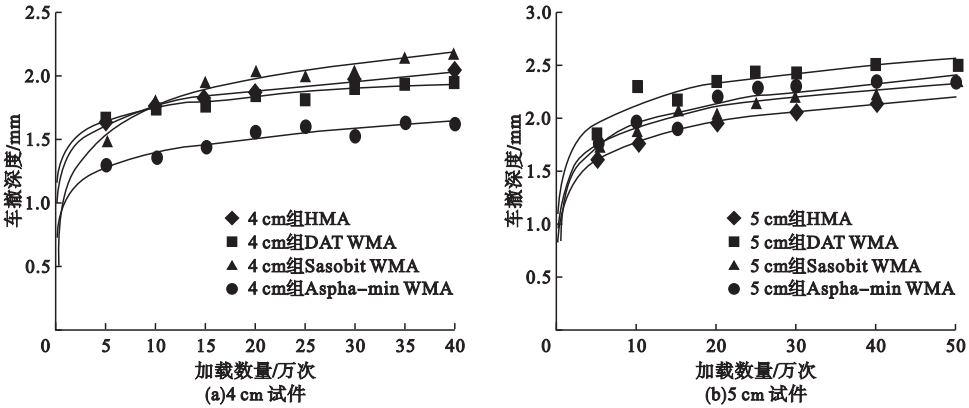


图5 试件车辙深度与加载次数回归曲线

Fig. 5 Regression curve of rutting depth and load times

表12 试件车辙深度与加载次数回归系数

Table 12 Regression coefficient of rutting depth and load times

混合料类型	4 cm 试件			5 cm 试件		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
HMA	0.188 6	1.328 1	0.993 0	0.251 6	1.217 7	0.992 9
Evotherm DAT WMA	0.142 3	1.418 6	0.927 9	0.270 0	1.514 3	0.853 4
Aspha-min WMA	0.168 6	1.019 0	0.914 6	0.285 6	1.284 2	0.886 3
Sasobit WMA	0.307 5	1.059 9	0.951 7	0.248 1	1.358 3	0.968 3

关系。③所有试件的车辙深度与加载次数均呈显著的对数关系,且回归系数 *a* 越大,混合料车辙深度随加载次数增加而增长的越快。因此,回归系数 *a* 可以表征混合料抗车辙性能,其值越大,表明混合料抗车辙变形能力越差。由于两组试件厚度不同,以致两组试验得到的各混合料抗车辙能力大小排序不太一致。这是因为试件厚度越小,其在加载过程中自身级配骨架作用就越弱,试件内部混合料颗粒就越容易在挤压作用下发生侧向移动,从而使得混合料内部失稳,这种情况下,混合料试件的抗车辙变形能力更为依靠胶结料的黏结作用。这也说明,在 MMLS3 加速加载试验中采用 5 cm 厚度试件的试验结果来评价各混合料抗车辙性能更为可靠,表 11 中 5 cm 试件组的车辙深度预估值也证明了这一点,因为沥青老化程度更高的 HMA 车辙深度最小。④通过与常规车辙试验得到的混

合料抗车辙性能结果进行对比分析发现,采用 5 cm 厚度试件时 MMLS3 加速加载试验结果与常规车辙试验较为一致,即 HMA 抗车辙性能优于 WMA,但由于评价指标不同,所以对于不同种类 WMA 的抗车辙性能无法比较。⑤由于加载试验过程中,试件底部没有黏结力约束,所以试件厚度越小,则在车轮碾压过程中轮迹两侧越容易向上翘起,从而使得轮迹边缘处由底部向上逐渐开裂直至完全破坏,这也表明沥青层(试件)越薄,其抗疲劳开裂能力越差。⑥在加速加载试验过程中,各混合料试件产生疲劳裂缝的时间顺序从早到晚依次为:HMA、Aspha-min WMA、Sasobit WMA、Evotherm DAT WMA,试验结束时各混合料开裂情况如图 6 所示。其中 HMA 的裂缝非常明显,而 WMA 基本都是在加载结束前才开始出现微裂纹。

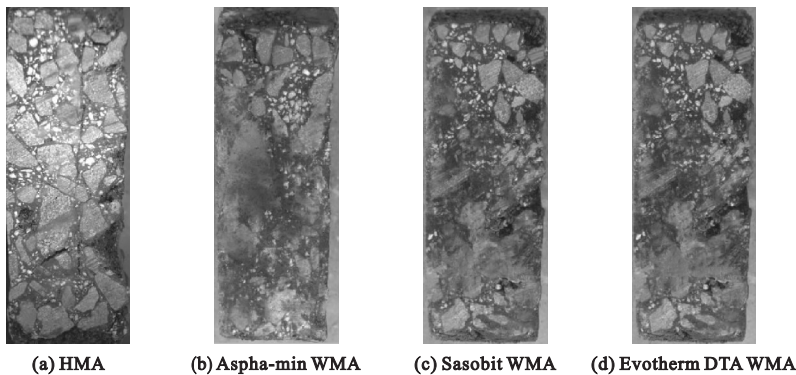


图6 加速加载试验过程中不同混合料试件疲劳开裂情况

Fig. 6 Fatigue cracking of different specimens during accelerated loading test

2.3 车辙深度预估结果分析

作用下车辙深度进行预估,则其预估结果如表13所示。

按式(5)对各混合料在1 200万次轴载

表13 车辙深度预估结果

Table 13 Results of rutting depth estimation

混合料类型	加载数量/万次	车辙深度/mm	
		4 cm 试件	5 cm 试件
HMA	1 200	2. 67	3. 00
Evotherm DAT WMA	1 200	2. 43	3. 43
Aspha-min WMA	1 200	2. 21	3. 31
Sasobit WMA	1 200	3. 24	3. 12

对比表13和表11可知,采用式(5)预估的车辙深度较小,主要原因是其考虑因素较少,仅考虑了温度和加载次数.因此式(5)可以用于评价某沥青混合料抗车辙能力,但是要预估沥青路面车辙深度时则需要采用式(1).分析车辙深度预估结果可以发现,5 cm厚度所有WMA试件的车辙深度都大于HMA,说明WMA抗车辙能力稍差,这与WMA沥青老化程度低、沥青较软有关.不过从长期来看,其抗车辙能力与HMA相差不大,而且车辙变形也在可接受范围之内.

3 结 论

- (1)Aspha-min WMA的水稳定性较差,而Sasobit WMA的水稳定性也处于较低水平,在多雨地区尤其是多雨寒冷地区使用时都应采取一定改善措施.
- (2)添加温拌剂后沥青混合料的抗车辙性能基本都能达到HMA的技术水平,而抗

疲劳性能则优于HMA,且沥青路面越厚,其优势越明显.

(3)沥青混合料的车辙变形曲线存在两个阶段:迅速增大的压密阶段和稳定增加的蠕变阶段,且同加载次数呈现良好的对数关系,而回归系数 a 可以较好地表征沥青混合料的抗车辙性能.

(4)加速加载试验中,所有混合料车辙变形均在加载20万次以后开始逐渐趋于稳定,说明采用MMLS3加速加载试验评价沥青混合料高温抗车辙性能时标准试验加载次数可以选择20~30万次.

参考文献

[1] KRISTJANSDDOTTIR O. Warm mix asphalt for cold weather paving[D]. Seattle: University of Washington, 2006.

[2] ZAUMANIS M. Warm mix asphalt investigation [D]. Lyngby: Riga Technical University, 2010.

[3] HURLEY G, PROWELL B. Evaluation of sasobit for use in warm mix asphalt [R].

- Auburn; NCAT report 05 - 06, 2005.
- [4] CORRIGAN M. Warm mix asphalt update [C]. Baton Rouge: Workmix Seminar and Demonstration, 2009.
 - [5] HURLEY G, PROWELL B. Evaluation of aspha-min for use in warm mix asphalt [R]. Auburn; NCAT report 05 - 04, 2005.
 - [6] HURLEY G, PROWELL B. Evaluation of evotherm for use in warm mix asphalt [R]. Auburn; NCAT report 06 - 02, 2006.
 - [7] 黄开斌. 温拌沥青及其混合料路用性能试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.
(HUANG Kaibin. The testing research on the performance of warm-mixed asphalt and warm mix asphalt [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008.)
 - [8] 朱沅峰. 不同添加剂温拌沥青混合料使用性能比较[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
(ZHU Yuanfeng. Comparison of performance of warm mix asphalt with different additives [D]. Changsha: Hunan University, 2010.)
 - [9] 秦永春, 黄頌昌, 苏玉昆, 等. 温拌沥青混合料中沥青在施工阶段的老化程度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(9): 1200 - 1202.
(QIN Yongchun, HUANG Songchang, SU Yukun, et al. Aging of asphalt from warm mix asphalt mixture during construction [J]. Journal of tongji university (natural science), 2009, 37(9): 1200 - 1202.)
 - [10] 孟良. 温拌沥青混合料使用性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
(MENG Liang. Study on the using performance of warm mix asphalt [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
 - [11] 窦晖. 基于表面能理论的温拌沥青混合料水稳定性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
(DOU Hui. Research on water stability of warm mix asphalt based on the theory of surface energy [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012.)
 - [12] 陈伟, 王林, 胡宗文. 温拌 SBS 沥青混合料成型温度确定及水稳定性研究[J]. 公路, 2012(3): 117 - 121.
(CHEN Wei, WANG Lin, HU Zongwen. Determination of optimum shaping-temperature and research on moisture susceptibility of SBS warm mix asphalt mixture [J]. Highway, 2012(3): 117 - 121.)
 - [13] 刘双. 不同机理温拌沥青混合料应用性能评价研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
(LIU Shuang. Research on application performance evaluation of varied mechanism warm mix asphalt [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.)
 - [14] KANITPONG K, SONTONG S, NAM K, et al. Laboratory study on warm mix asphalt additives [C]. Washington, D. C.: 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2007.
 - [15] WASIUDDIN N, SELVARATNAM S, ZAMAN M, et al. A comparative laboratory study of sasobit® and aspha-min® in warm mix asphalt [C]. Washington, D. C.: 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2007.
 - [16] KLAUS-WERNER D. Warm mix asphalt in germany, a technology beyond reduced mixing and paving temperatures [C]. St. Louis: 2nd International Warm Mix Conference, 2011.
 - [17] ARNISCHFEGGER S. Aspha-min retrospectives and prospects [R]. BAST (Btmdesanstalt Fair StraBenwesen); Presentation to WMA Scan Team, 2007.
 - [18] 李忠凯. 温拌沥青混合料技术在欧洲的实践[J]. 中外公路, 2010, 30(4): 286 - 291.
(LI Zhongkai. Practice of warm mix asphalt mixture technology in Europe [J]. Journal of China & foreign highway, 2010, 30(4): 286 - 291.)
 - [19] BRIAN D P, GRAHAM C H. Warm mix asphalt best practices [R]. Auburn: NAPA 53rd Annual Meeting, 2008.
 - [20] NCAT. Performance of warm mix asphalt [R]. Lexington: NCHRP Report 9 - 47, 2013.
 - [21] DAVIDSON JK. Evotherm trial; aurora ontario & city of calgary & ramara township road 46 [R]. Ontario: McAsphalt Engineering Services, 2005.
 - [22] CHOWDHURY A, BUTTON JW. A review of warm mix asphalt [R]. Texas: Texas Transportation Institute Technical Report 473700 - 00080 - 1, 2008.
 - [23] JOHN DA, ERIC H, JOHN B. et al. Warm-mix asphalt: European practice [R]. Washington, D. C.: FHWA - PL - 08 - 007, 2008.
 - [24] 公路中心. 温拌沥青混合料性能研究和应用 [R]. 北京: 交通运输部公路科学研究院, 2008.
(Highway Center. Performance research and application of warm mix asphalt mixture [R]. Beijing: Research Institute of Highway Ministry of Transport, 2008.)
 - [25] 车飞. 沥青混合料离析对季冻区沥青路面长期路用性能的影响[D]. 西安: 长安大学, 2009.
(CHE Fei. The influence on asphalt pavement long-term performance in the seasonal frozen region of asphalt mixture segregation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.)
 - [26] 杨三强. 钢桥面铺装加速加载实验研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
(YANG Sanqiang. The accelerated testing study on the steel bridge deck pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.)
 - [27] 中交路桥技术有限公司. 基于多指标的沥青路面结构设计方法研究 [R]. 北京: 中交基础设施养护集团有限公司, 2012.
(CCCC Road and Bridge Technology Co., Ltd. Research on structural design method of asphalt pavement based on multi index [R]. Beijing: CCCC Infrastructure Maintenance Group Co. Ltd, 2012.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)