

温拌沥青混合料水稳定性能改善措施

王 春¹,张喜艳²,郝培文¹

(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)水稳定性能,为解决温拌沥青混合料水稳定性不足提供参考。**方法** 对 3 种温拌沥青混合料的水稳定性能进行浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验和动水冲刷试验,采用单轴贯入试验、低温劈裂试验对动水冲刷后的 WMA 试件水稳定性能进行评估。**结果** 3 种 WMA 残留稳定度都可达到热拌沥青混合料(HMA)的技术水平,但冻融劈裂强度比降幅较大,尤其是添加 Aspha-min 后混合料的水稳定性较差;采用抗剥落剂和硅藻土对 Aspha-min 和 Sasobit 两种温拌剂进行复配后,两种温拌沥青混合料的水稳定性能都得到了显著改善;采用动水冲刷试验时 WMA 水稳定性能与残留稳定度结果较为一致。**结论** 在添加温拌剂后沥青混合料的水稳定性能会受到不利影响,在多雨地区尤其是多雨寒冷地区使用时可采用抗剥落剂或硅藻土进行改善。

关键词 道路工程;温拌沥青混合料;水稳定性能;复配改性

中图分类号 TU528;U414

文献标志码 A

Study on Improvement Measures of Water Stability of Warm Mix Asphalt Mixture

WANG Chun¹,ZHANG Xiyan²,HAO Peiwen¹

(1. Key Laboratory for Road Structure and Materials of Ministry of Transportation, 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 water stability and improvement measures of warm mix asphalt mixture which added with Aspha-min, Sasobit and DAT respectively. The immersion Marshall test, freeze-thaw splitting test and dynamic water scouring test were used to evaluate the water stability of three kinds of WMA, and the water stability of WMA specimens after dynamic water scouring was evaluated by uniaxial penetration test and splitting test. The results show that the residual stability of the three WMA can reach the technical level of HMA, but the decrease of freeze-thaw splitting strength ratio is large, especially after adding Aspha-min. The

收稿日期:2022-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51978073);陕西省交通运输厅科研项目(15-11K)

作者简介:王春(1984—),男,博士,主要从事路面结构与材料等方面研究。

water stability of WMA has been significantly improved by using anti-stripping agent and diatomite to mix Aspha-min and Sasobit. The results of residual stability of WMA are consistent when hydrodynamic scouring test is adopted. In general, the water stability of asphalt mixture after adding warm mix agent will be adversely affected, so anti-stripping agent or diatomite should be used to improve it when it is used in rainy areas, especially in rainy and cold areas.

Key words: road engineering; warm mix asphalt; water stability; compound modification

沥青路面的水损害基本可以归为以下两方面原因^[1]:一是路面内部的水分在车辆和环境因素作用下,侵入到了集料与沥青界面,导致二者的粘附性下降;二是沥青路面结构内的水分在车辆荷载作用下产生了冲刷作用,更加速了沥青膜的剥离,进而导致集料颗粒出现松散掉粒,形成坑槽等病害。

温拌沥青混合料(Warm Mix Asphalt, WMA)由于集料加热温度低水分难以充分烘干,使其在生产过程中就在集料表面残留了一些水分,使得混合料始终受到水损害的威胁^[2-6]。由于不同类型的温拌技术降黏机理不同,所以添加不同温拌剂以后对混合料水稳性能的影响也略有不同。温拌剂 Aspha-min 对 WMA 的水稳定性影响最大^[7-8],因为其释放的残留结晶水及结晶水释放完成后的残留粉末都会影响沥青与集料的粘附性。国外许多研究都认为 WMA 路用性能和热拌沥青混合料(Hot Mix Asphalt, HMA)基本能达到同一水平,法国研究者通过室内和现场试验研究发现 WMA 只有水稳性能稍差于 HMA^[9]。黄开斌^[10]采用常规试验及 DSR、低温蠕变试验等对添加 Sasobit、Aspha-min 的 WMA 与 HMA 混合料性能进行对比分析,发现添加两种温拌剂的 WMA 的水稳定性都没有受到影响,但是对于低温性能则都有不利影响,而添加 Sasobit 的 WMA 提高了高温稳定性。孟良^[11]通过测试 WMA 试件与 HMA 试件在冻融循环前后的动态模量,提出以冻融动态模量比来评价 WMA 的水稳定性,研究表明该方法与传统的冻融劈裂强度比具有良好的相关性,在添加 Evotherm DAT 和 Saso WAM 温拌剂后

混合料的水稳定性仍能达到 HMA 水平。窦晖^[12]采用“表面能”理论对温拌沥青混合料的水稳定性进行了计算分析,发现沥青与集料种类对计算结果都有影响,但当采用碱性集料如石灰岩时,则不论采用何种沥青其水稳定性都不会受到影响。陈伟等^[13]通过冻融劈裂试验以及汉堡车辙试验对某乳化型温拌沥青混合料进行试验,发现 WMA 的水稳定性与 HMA 基本一致。刘双^[14]在采用冻融试验、车辙试验、小梁弯曲试验对分别添加 Aspha-min、Sasobit、Evotherm DAT 的 WMA 与 HMA 路用性能进行对比分析,发现添加温拌剂后混合料性能相对 HMA 并没有下降。李鹏飞^[15]针对有机蜡型 WMA 的水稳定性进行了研究,通过阐述该类 WMA 水损害发生的细观行为,提出了该类 WMA 中集料的临界含水率,为改善有机蜡类 WMA 水稳性能提供了理论依据。

由于温度降低,集料不能完全烘干,残留的水分必然会影响到沥青与集料的粘附,因此 WMA 的水稳定性会有所下降。基于此,笔者对添加 Aspha-min、Sasobit 和 DAT3 种温拌剂的 WMA 水稳定性进行了浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验和动水冲刷试验,根据试验结果分析了不同 WMA 水稳定性衰减原因,提出了采用抗剥落剂和硅藻土对 Aspha-min 和 Sasobit 两种温拌剂进行复配改性的方式来改善这两种 WMA 的水稳性能。

1 试验

1.1 试验材料

粗、细集料采用角闪岩,矿粉采用石灰岩,其表现相对密度为 2.744,不同规格矿料

的密度见表1。

表1 集料密度

Table 1 The density of aggregates

矿料粒径/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	—

沥青采用 SBS 改性沥青,其各项技术指标见表2。温拌剂选择沸石类 Aspha-min、有机蜡类 Sasobit 和表面活性类 Evotherm DAT,其各项技术指标见表3。

表2 沥青技术指标

Table 2 The 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 The technical specification of warm mix agent

温拌剂种类	用量与用法
Aspha-Min	掺量为混合料质量的0.3%,与沥青同时加入集料,不需要延长拌和时间
Sasobit	掺量为沥青结合料质量的1.5%,采取干法添加,需要适当增加干拌时间
Evotherm DAT	掺量为沥青结合料质量的1/9,添加时应与沥青同步,并直接喷射到沥青上

矿料级配为 AC-13,合成结果见表4。采用马歇尔试验方法确定混合料最佳油石比(见表5),WMA采用相同级配HMA的油石

比。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℃。

表4 AC-13 沥青混合料合成级配

Table 4 The gradation of AC-13

筛孔孔径/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 最佳油石比下 AC-13 马歇尔试验结果

Table 5 The optimum asphalt content of AC-13

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

1.2 水稳定性能

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的水稳定性试验方法,对1种HMA与3种WMA的残留稳定度、冻融劈裂进行了验证,试验结果见表6~表7。

表6 浸水马歇尔试验结果

Table 6 The results of immersion Marshall test

混合料类型	浸水48h稳定度/kN	浸水0.5h稳定度/kN	浸水残留稳定度/%	浸水残留稳定度规范要求/%
HMA	16.22	16.83	96.40	>85
Aspha-min WMA	13.56	13.44	100.91	>85
Sasobit WMA	14.35	14.88	96.42	>85
DAT WMA	11.66	12.12	96.24	>85

表 7 冻融劈裂试验结果

Table 7 The results of freeze-thaw splitting test

混合料类型	冻融循环后劈裂强度/MPa	未冻融循环劈裂强度/MPa	冻融劈裂强度比/%	冻融劈裂强度比规范要求/%
HMA	1. 138 4	1. 197 6	94. 75	>80
Aspha-min WMA	0. 711 1	1. 020 1	69. 70	>80
Sasobit WMA	0. 806 7	0. 966 0	83. 51	>80
DAT WMA	0. 712 1	0. 831 3	85. 65	>80

由以上试验结果可知,温拌沥青混合料的残留稳定度都可以达到热拌沥青混合料的水平,但是冻融劈裂强度比都有不同程度的下降,其中使用 Aspha-min 的最差。

1.3 采取改善措施后的水稳性能

基于上述温拌沥青混合料水稳定性的不利情况,笔者通过复配改性的方法对 Aspha-min 和 Sasobit 两种固体类温拌剂进行改进。目前可用于改善混合料水稳性能的材料种类很多,但应用较多的主要有抗剥落剂、消石灰、水泥、硅藻土等,其中抗剥落剂又分液体和固体两大类。通过分析各种材料添加于沥青混合料时的改善效果,笔者选择以抗剥落

剂和硅藻土来进行复配,由于两种温拌剂都是固体,所以抗剥落剂也选择固体粉末状材料。笔者所选复配材料 A 为新型非胺类沥青抗剥落剂,外观为棕黄色固体微颗粒(见图 1(a));所选复配材料 B 为硅藻土,是一种微细粉末状固体,呈浅黄色(见图 1(b)),其中 SiO₂ 质量分数达到 90% 以上,具有化学性质稳定、热稳定性好等特性,能够有效改善沥青混合料的使用性能。两种复配材料的复配方案如表 8 所示。由于添加温拌剂对混合料的残留稳定度基本没有影响,因此复配后仅做冻融劈裂试验,试验结果如表 9 所示。



图 1 复合温拌剂的两种植配材料

Fig. 1 Two kinds of materials for composite warm mixing agent

表 8 复合温拌剂复配方案

Table 8 The composite scheme of composite warm mixing agent

方案	复配材料组成	掺量/%
①	$m(\text{Aspha-min}):m(\text{A})=22:1$	7. 0
②	$m(\text{Aspha-min}):m(\text{B})=5:3$	10. 7
③	$m(\text{Aspha-min}):m(\text{A}):m(\text{B})=22:1:13. 5$	11. 0
④	$m(\text{Sasobit}):m(\text{A})=5:1$	1. 8
⑤	$m(\text{Sasobit}):m(\text{B})=3:8$	5. 5
⑥	$m(\text{Sasobit}):m(\text{A}):m(\text{B})=15:3:40$	5. 8

注:掺量是指复配材料质量占沥青质量的百分比。

表9 冻融劈裂试验结果

Table 9 The results of freeze-thaw splitting test

混合料类型	冻融循环后劈裂强度/MPa	未冻融循环劈裂强度/MPa	冻融劈裂强度比/%	冻融劈裂强度比规范要求/%
Aspha-min WMA	0.711 1	1.020 1	69.70	>80
方案①	0.811 6	0.936 6	86.66	>80
方案②	1.187 6	1.431 3	82.97	>80
方案③	1.212 5	1.257 6	96.41	>80
Sasobit WMA	0.806 7	0.966 0	83.51	>80
方案④	0.814 5	0.858 5	94.87	>80
方案⑤	1.037 2	1.180 5	87.86	>80
方案⑥	1.155 3	1.215 8	95.02	>80

1.4 动水冲刷试验

目前,国内外广泛应用的评价沥青混合料水稳定性的试验方法大多属于静态浸水试验,而沥青路面内部水分在车辆荷载作用下却会产生动水压力,即实际情况远比试验条件苛刻。鉴于此,笔者在常规浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验的基础上,采用课题组研发的动水压力冲刷试验系统(见图2)^[2],对Aspha-min、Sasobit、DAT三种温拌沥青混合料及改进后的复合温拌沥青混合料的水稳定性进行测试与评价,以更好地分析温拌剂对沥青混合料水稳定性的影响作用。

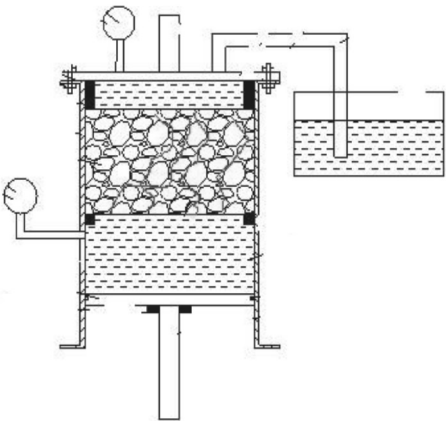


图2 动水冲刷试验系统

Fig.2 The hydrodynamic scouring test system

该试验系统通过对沥青混合料试件循环不断地施加正负压力,使水流在压力作用下不断冲刷试件内部孔隙,从而模拟沥青路面在车辆荷载作用下的动水冲刷作用。

本次试验采用的试验参数如下^[1]:

动水冲刷压力:正压100 kPa,负压90 kPa;动水冲刷温度:60℃,冲刷前试件需先在60℃水温中保温1小时;往复冲刷次数:200次,约1 h。

对冲刷后的沥青混合料试件,采用单轴贯入试验和劈裂试验对其力学性能进行评价,评价指标为冲刷后试件强度与未冲刷试件强度之比。

1.4.1 单轴贯入试验——位移强度法

采用位移强度法^[16]对动水冲刷后温拌沥青混合料的高温抗剪切性能进行研究。位移强度法是一种评价沥青混合料抗剪性能的新方法,加载方式与传统贯入剪切试验类似,但其半圆形压头可以更好的模拟实际路面的受力情况,而且在计算时同时考虑了应力强度和塑性位移。

试验条件及结果计算方式如下:

试件:标准马歇尔试件;

加载方式:采用位移控制方式,加载速度50 mm/min;

试验温度:60℃;

压头:半圆形压头(见图3),压头外径 D 为40 mm,倒角半径 r 为10 mm;

计算公式:试验结果按式(1)计算。

$$S_D = \frac{4P}{\pi [D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2})]^2} \quad (1)$$

式中: S_D 为应力强度,MPa; P 为应力最大值,

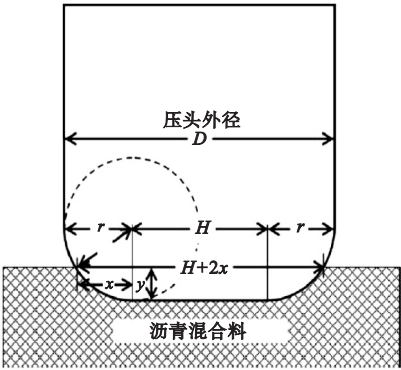


图3 压头尺寸

Fig.3 The size of indenter

表 10 单轴贯入试验结果

Table 10 The results of uniaxial penetration test

混合料类型	未冲刷试件			冲刷后试件			残留应力强度
	P/N	y/mm	S_D/MPa	P/N	y/mm	S_D/MPa	比/%
HMA	6 733.5	2.96	7.49	5 553.9	3.08	5.97	79.7
Aspha-min WMA	5 080.0	2.95	5.57	4 846.7	3.53	4.96	89.0
Sasobit WMA	5 506.3	3.39	5.75	4 830.9	3.57	4.93	85.8
DAT WMA	4 030.1	2.87	4.43	3 754.9	3.27	3.95	89.2
方案①	5 308.6	2.94	6.04	5 142.3	3.19	5.48	90.8
方案②	5 634.4	3.54	5.79	4 016.6	3.23	4.31	74.3
方案③	5 510.4	2.97	5.99	5 156.0	2.86	5.82	97.2
方案④	6 184.8	6.01	5.39	4 991.8	5.22	4.52	83.9
方案⑤	4 139.4	6.42	3.54	4 469.9	8.01	3.64	102.6
方案⑥	5 304.2	6.56	4.58	5 096.4	7.23	4.24	92.6

表 11 劈裂试验结果

Table 11 The results of splitting test

混合料类型	劈裂抗拉强度 R_T/MPa		残留强度
	未冲刷	冲刷后	比/%
HMA	3.74	3.72	99.5
Aspha-min WMA	3.29	3.03	92.1
Sasobit WMA	3.62	3.53	97.3
DAT WMA	3.56	3.35	94.2
方案①	3.71	3.66	98.7
方案②	3.73	3.63	97.6
方案③	3.64	3.59	98.6
方案④	3.55	3.36	94.6
方案⑤	3.66	3.57	97.6
方案⑥	3.59	3.37	94.1

N ; D 为外径,40 mm; r 为倒角内径,10 mm; y 为最大应力对应的位移,mm。试验结果如表 10 所示。

1.4.2 低温劈裂试验

采用 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 劈裂试验来评价温拌沥青混合料试件在动水冲刷后的力学性能,具体试验参照《沥青混合料劈裂试验》(JTG E20T0716—2011)进行,试件由马歇尔法双面各击实 75 次成型,试验加载速率为 1 mm/min。试验结果如表 11 所示。

劈裂试验结果如图 4 所示。

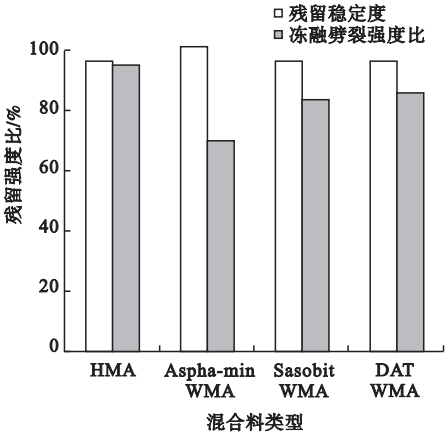


图 4 温拌沥青混合料水稳定性试验结果

Fig.4 The test results of water stability of WMA

由图 4 可知:

2 试验结果分析

2.1 水稳定性试验结果分析

对 HMA 与 WMA 的残留稳定度、冻融

(1)添加三种温拌剂后,WMA 的马歇尔稳定度相比 HMA 都有所下降,但是其残留稳定度则都达到了 HMA 的水平,其中添加 Sasobit 和 DAT 的都 HMA 的一致,而 Aspha-min 甚至超出了 HMA 的水平。

(2)三种 WMA 的劈裂强度也比 HMA 的劈裂强度降低了一些,而且由于冻融试验条件更加苛刻,所以 WMA 的 TSR(表征冻融劈裂强度比)普遍没有达到 HMA 的技术水平,添加 Sasobit 和 DAT 的还能稍稍高出规范要求值 80%,而添加 Aspha-min 的则下降较严重,甚至比规范要求值还低了十个百分点。这是由于 WMA 降低生产温度后,集料中原有的水分不能够充分烘干,而且温拌剂中引入的水分(Aspha-min 与 DAT)也会有一些残留在沥青与集料界面之间,从而导致温拌沥青混合料始终存在潜在的水损害威胁,当经历冻融循环后,其中残留的水分也会经历冻胀与消融的过程,更加速了沥青从集料表面剥离,导致集料剥落松散直至坑槽。Aspha-min WMA 试件在经历冻融循环后试件破坏面上集料颗粒表面的沥青膜则明显剥离。

(3)从残留稳定度试验可以看出,尽管添加温拌剂后混合料的稳定度都有下降,但是添加 Sasobit 的明显较其他两种下降较少,这说明晶格结构的 Sasobit 溶于沥青中后呈网状分布,起到了加筋作用。但由于 Sasobit 仍然具有蜡的性质,所以添加以后也会影响沥青的低温抗裂性能,因此其 TSR 也较小。

(4)综上可知,使用温拌添加剂后混合料的水稳定性普遍有下降趋势,因此,在工程应用中应该对 WMA 的水稳定性进行严格检验,当水稳定性较差时必须采取改善措施。

2.2 采取改善措施后水稳定性试验结果分析

对 Aspha-min 和 Sasobit 两种固体类温拌剂进行复配改性后,其混合料残留稳定度、

冻融劈裂试验结果如图 5 所示。

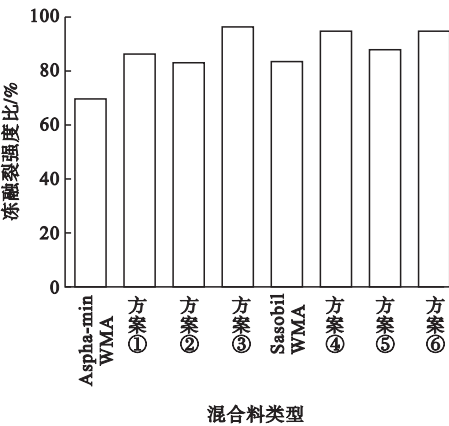


图 5 添加复合温拌剂的沥青混合料冻融劈裂强度比

Fig. 5 The TSR with composite warm mixing agent after freeze-thaw splitting test

由图 5 可知,采用抗剥落剂与硅藻土对两种温拌剂进行复配改性后,WMA 的冻融劈裂强度比都有了显著提高。

(1)对于 Aspha-min 温拌剂,采用抗剥落剂复配比硅藻土对 TSR 的改善效果更好,而同时采用抗剥落剂与硅藻土进行复合改性时效果达到最佳,其 TSR 排序为 TSR(方案③) > TSR(方案①) > TSR(方案②) > TSR(Aspha-min WMA)。

(2)对于 Sasobit 温拌剂,采用抗剥落剂复配比硅藻土对 TSR 提高更多,而同时采用抗剥落剂与硅藻土进行复合改性时与单独使用抗剥落剂改性的效果基本一样,各方案 TSR 排序为 TSR(方案⑥) > TSR(方案④) > TSR(方案⑤) > TSR(Sasobit WMA)。

(3)综上可知,抗剥落剂对 WMA 水稳定性的改善效果比硅藻土更好,如图 6 所示,未添加抗剥落剂的混合料冻融劈裂后试件内部沥青与集料剥离现象非常明显,而添加抗剥落剂后冻融劈裂试件内部则基本看不到沥青与集料剥离的情况。因此对于 Aspha-min 和 Sasobit 温拌剂,当仅考虑水稳定性时,应优先推荐采用抗剥落剂进行复配。

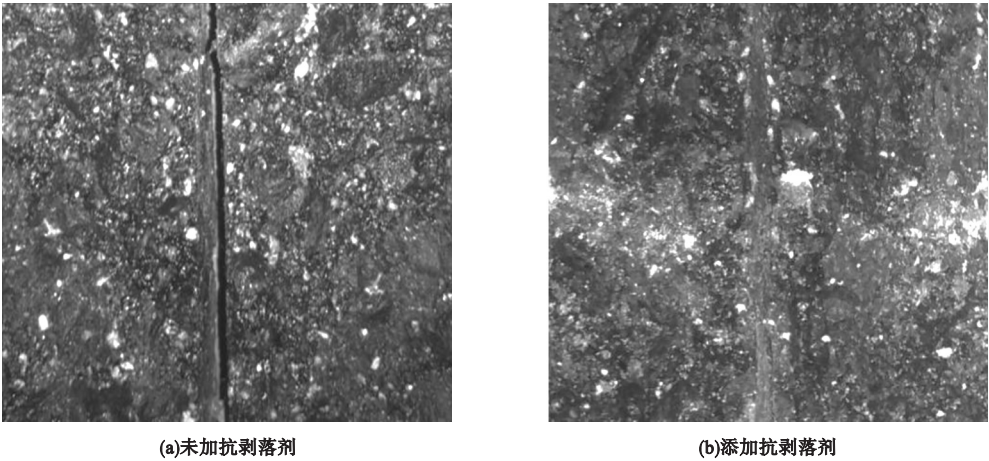


图6 添加抗剥落剂前后 Aspha-min 温拌沥青混合料冻融后试件

Fig. 6 The specimen with composite warm mixing agent after freeze-thaw splitting test

2.3 动水冲刷试验结果分析

2.3.1 单轴贯入强度

由表 10 可知:①从未冲刷试件的应力强度可以看出,添加温拌剂后混合料的抗剪强度都有不同程度的下降。这也表明 WMA 拌和温度降低后,确实使得沥青老化程度减弱,沥青相对而言仍然较软,对混合料抗剪切性能较为不利。②动水冲刷前后 WMA 试件单轴贯入的位移也基本上都大于 HMA,说明 WMA 的抗变形能力确实有所削弱。③所有混合料的残留应力强度比都处于较高水平,而且添加温拌剂后混合料的残留应力强度比不降反升,说明添加温拌剂后混合料的水稳定性得到了改善,这与残留稳定度结果较为一致,而与冻融劈裂强度比完全不符,这应该是与动水冲刷试件的试验条件没有冻融劈裂苛刻有关,动水冲刷试件 60 ℃浸水时间仅有 2 h,而且试件是 75 次击实成型的,空隙率较冻融劈裂试件小。④在对 Aspha-min 和 Sasobit 两种温拌剂进行复合改性后,混合料残留应力强度比有所提高,而最大应力对应位移也有一定增长,说明复合改性后混合料的水稳定性有一定改善,而高温抗变形能力则有所下降。

2.3.2 低温劈裂试验

由表 11 可知:①从未冲刷试件的劈裂抗

拉强度来看,添加温拌剂后混合料的低温抗裂性能都有不同程度的下降,表明温拌剂的使用对混合料的低温抗裂性能确有不影响。②添加温拌剂后沥青混合料的残留劈裂强度比都有所下降,但是仍然都处于较高水平,这与冻融劈裂试验结果仍不相符,可见即使采用动水冲刷,如果试验条件没有冻融劈裂苛刻,那么其劈裂强度仍然不会受到太大影响。③Aspha-min 温拌剂在复合改性后,其水稳定性都得到了不同程度的改善;而 Sasobit 温拌剂在复合改性后,只有方案⑤(单独添加硅藻土)的水稳定性有所提高,而方案④和⑥的水稳定性则都有所降低。

3 结 论

(1)通过常规的水稳定性试验,发现使用沸石类 Aspha-min 温拌剂的沥青混合料水稳定性较差,而使用有机蜡类 Sasobit 温拌剂的沥青混合料水稳定性也处于较低水平,在多雨且寒冷地区使用时应采取一定改善措施。

(2)采用抗剥落剂和硅藻土对 Aspha-min 和 Sasobit 温拌剂进行复配改性后两种 WMA 的水稳性能都能得到明显改善,在综合考虑不同方案性价比后推荐采用硅藻土进行复配,复配改性后的 WMA 可以广泛适用

于不同气候区域。

(3) 动水冲刷试验、单轴贯入试验以及低温劈裂试验结果表明,笔者采用的动水冲刷试验条件对混合料强度的损害要远小于冻融作用。

参考文献

- [1] 蒋锦毅. 高温多雨潮湿地区沥青混合料级配优化设计及技术性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
(JIANG Jinyi. Study on gradation optimization design and technical performance of asphalt mixture at high temperature and rainfall [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.)
- [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: Work Mix Eeminar 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] 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: Hu'nan University, 2010.)
- [8] 王春, 郝培文, 张喜艳. 基于加速加载试验的温拌沥青混合料长期性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(5): 860-868.
(WANG Chun, HAO Peiwen, ZHANG Xiyan. Study on the long-term performance of warm mix asphalt by accelerated loading test [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(5): 860-868.)
- [9] 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.)
- [10] 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 an warm mix asphalt [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008.)
- [11] 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.)
- [12] 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.)
- [13] 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.)
- [14] 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.)
- [15] 李鹏飞. 集料残留水分对温拌沥青混合料水稳定性的影响研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
(LI Pengfei. Study on influence of residual moisture of aggregate on water stability of warm mix asphalt [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.)
- [16] 杨凯. 布敦岩沥青混合料配合比设计方法及性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
(YANG Kai. Study on the mixture design and technical characteristic of asphalt mixture with the Buton rock asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)