

文章编号:1007-9629(2022)06-0607-06

真空饱水衡量水对沥青混合料高温稳定性的影响

李秀君^{1,*}, 赵麟昊¹, 欧阳欢¹, 刘立伟², 王宁宁¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093;

2. 嘉兴市秀洲区公路与运输管理服务中心, 浙江 嘉兴 314000)

摘要:针对水影响沥青混合料高温稳定性的问题,通过真空饱水试验深入探究沥青混合料内黏聚力、内摩擦角和动稳定度随饱水率的变化规律,并对多功能改性沥青混合料、SBS 改性沥青混合料和基质沥青混合料进行对比研究.结果表明:水对 SBS 改性沥青混合料和基质沥青混合料的动稳定度、内黏聚力和内摩擦角有较大影响,各参数随饱水率的增大而降低;多功能改性沥青混合料的动稳定度、内黏聚力和内摩擦角几乎不受饱水率变化的影响,表现出极强的抗水温耦合特性.

关键词:高温稳定性;改性沥青;真空饱水;内黏聚力;内摩擦角;水温耦合

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.06.009

Effect of Water on High Temperature Stability of Asphalt Mixture Based on Vacuum Water Saturation

LI Xiujun^{1,*}, ZHAO Linhao¹, OUYANG Huan¹, LIU Liwei², WANG Ningning¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Jiaxing Xiuzhou District Road and Transportation Management Service Center, Jiaxing 314000, China)

Abstract: As water affects the stability of asphalt mixture at high temperature, the changes of internal cohesion, internal friction angle and dynamic stability with water saturation rate were studied by vacuum water saturation test. The multi-function modified asphalt mixture, SBS modified asphalt mixture and matrix asphalt mixture were selected for comparative study. The results show that water has a great influence on the dynamic stability, internal cohesion and internal friction angle of SBS modified asphalt mixture and matrix asphalt mixture, and each parameter decreases with the increase of water saturation rate. The dynamic stability, internal cohesion and internal friction angle of the multifunctional modified asphalt mixture are almost not affected by the change of water saturation rate, showing a strong resistance to the water temperature coupling.

Key words: high temperature stability; modified asphalt; vacuum water saturation; internal cohesion; internal friction angle; water temperature coupling

永久变形是高温多雨地区沥青路面的主要病害, 占有病害类型的比例常达 80% 以上^[1-2]. 广泛应用的 SBS 改性沥青混合料动稳定度可达规范限值的 2 倍, 而在高温多雨地区的应用中其仍会出现较为严重的车辙病害^[3]. 究其原因, 水在沥青膜中的扩散作用会削弱沥青混合料的高温稳定性.

为定量分析水对沥青混合料高温稳定性的影响, 本文通过真空饱水试验, 深入探究沥青混合料内黏聚力、内摩擦角和动稳定度随饱水率的变化规律, 并对多功能改性沥青混合料(MFMA)、SBS 改性沥青混合料(SBSMA)和基质沥青混合料(MA)进行对比研究.

收稿日期:2021-03-12; 修订日期:2021-06-15

基金项目:浙江省公路科技计划项目(2019H15)

第一作者(通讯作者):李秀君(1976—),女,江苏江阴人,上海理工大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail: 363096289@qq.com

1 试验

1.1 原材料

基质沥青为中国石化 70# 沥青,其技术指标见表 1。

表 1 基质沥青的技术指标

Table 1 Technical specifications of basic asphalt

Specification	Test value	Evaluation	Test method
Penetration(25 °C, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	66	Qualified	T0604-2011
Softening point/°C	47	Qualified	T0606-2000
Dynamic viscosity (60 °C)/(Pa·s)	221	Qualified	T0620-2000
Ductility(15 °C)/cm	>150	Qualified	T0605-2011

矿料来源于浙江省某公路大修工程,确定沥青混合料的最佳油石比为 4.3%(质量分数,文中涉及的掺量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比),级配为 AC-13 密级配。SBS 改性剂为线形结构^[4-6],且为提高沥青混合料高温稳定性,同时兼顾经济性,SBS 改性沥青混合料中 SBS 掺量为 4.5%。结合前期试验结果^[7],为达到最佳路用性能,多功能改性剂掺量为混合料质量的 0.3%,其双组分调配质量比为 2:1。

1.2 试验方法

为定量分析水对沥青混合料高温稳定性的影响,对沥青混合料进行真空饱水试验,确定混合料在不同时间 t 下的饱水率 w_F ^[8]。参照 JTGE20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,将不同饱水率试件放入 60 °C 水箱中养护 48 h,以模拟高温多雨地区的水和温度耦合作用(简称水温耦合作用),随后进行劈裂试验、单轴贯入试验、车辙试验,测试沥青混合料的内黏聚力 c 、内摩擦角 φ 及不同饱水率下的动稳定度 DS。采用徕卡显微镜将 3 种混合料表面放大 500 倍,表征了混合料的表面状态。

2 结果与讨论

2.1 沥青混合料真空饱水试验结果分析

对沥青混合料试件进行真空饱水试验,得到 MA、SBSMA、MFMA 的孔隙率(体积分数)分别为 4.4%、4.5%、1.9%;其不同时间 t 下的饱水率见图 1。由图 1 可见,对 MFMA:在吸水的前 30 s,试件饱水率达到 20%,试件表面空隙迅速被水分占据,饱水率迅速增大;30~120 s 时,饱水率增长到 50%,该过程中水分逐步填充试件内部开口孔隙,试件饱水率出现一定程度的线性增长;120 s 后,试件的孔

隙基本全部被水占据,试件内部深处部分开口孔隙进水,饱水率增长开始放缓;180 s 时,水分在试件中的饱水率达 61% 左右。

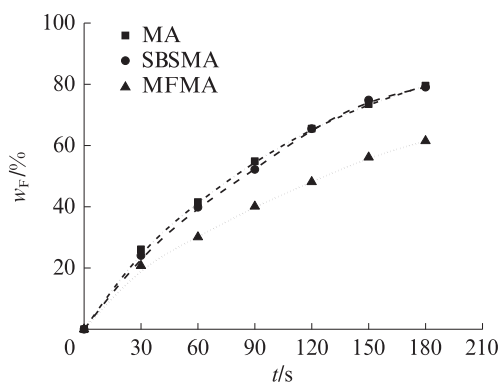


图 1 沥青混合料不同时间 t 下的饱水率

Fig. 1 w_F of asphalt mixtures at different t

由图 1 还可见:SBSMA 和 MA 在 180 s 时的饱水率均达到在 78% 左右,高于 MFMA 的饱水率。这是由于 MFMA 的孔隙率远低于 SBSMA 和 MA,导致其进水量较少。多功能改性剂通过促使沥青分子链发生位移,形成网状结构,具有高温降黏的作用,即在温度超过 140 °C 时,多功能改性剂使沥青黏度降低,因此在相同条件下,与 SBSMA 和 MA 相比, MFMA 有更低的孔隙率,水分不易进入。

2.2 沥青混合料的内黏聚力、内摩擦角

沥青混合料的抗剪强度可由莫尔-库伦理论来表示^[9]。为简化计算,采用无侧限单轴贯入试验、劈裂试验替代三轴试验。通过单轴贯入强度 σ_u 和劈裂强度 σ_c 为直径绘制莫尔圆,由公切线斜率、截距分别确定内摩擦角 φ 、内黏聚力 c ^[10],结果见图 2。

由图 2 可见:MA、SBSMA 内黏聚力 c 拟合公式的指数位为负数,即与饱水率呈负相关;SBSMA 内黏聚力下降幅度最大,其常数位为 3 种混合料中最高;MA 内黏聚力 c 的下降幅度仅次于 SBSMA,其常数位远低于 SBSMA;SBSMA 的内黏聚力受饱水率影响较大,但仍保有较高的内黏聚力;MA、SBSMA 的内摩擦角 φ 拟合公式的指数位为负数,与饱水率呈负相关;与 SBSMA 内摩擦角 φ 的变化相比,MA 内摩擦角的下降幅度最大,其常数位为 3 种混合料中最高;SBSMA 内摩擦角的降幅远小于 MA,且二者常数位相差不大;SBSMA 内摩擦角优于 MA;MFMA 的内黏聚力和内摩擦角方程指数位均拟合为 0,内黏聚力和内摩擦角保持为常数,不受饱水率影响。综上,水对 MA 内黏聚力、内摩擦角的影响程度最大,其次为 SBSMA,而 MFMA 基本不受影响。

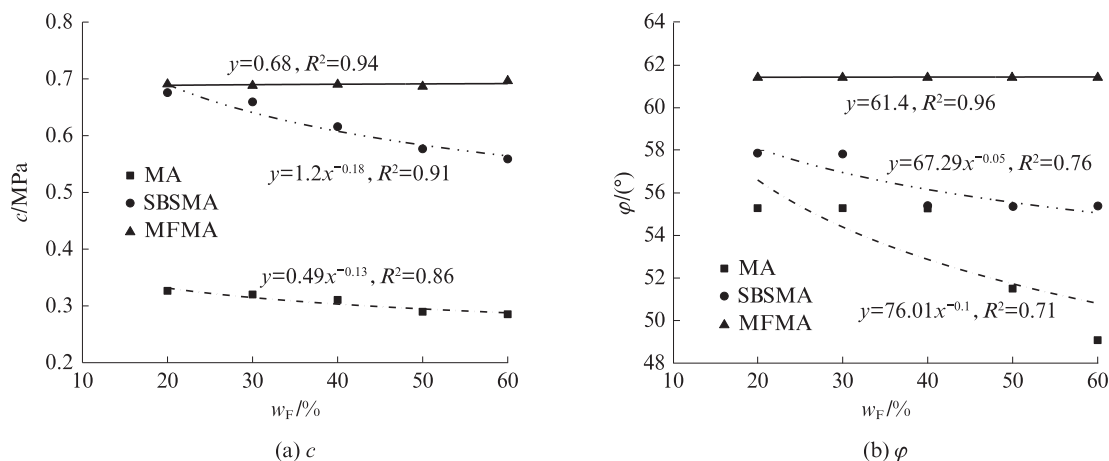


图2 沥青混合料的内黏聚力和内摩擦角

Fig. 2 c and φ of asphalt mixtures

沥青混合料表面的显微镜照片见图3。由图3可见:MFMA表面的沥青胶浆分布均匀,没有出现胶浆的聚集,其自由沥青胶浆含量较少,结构沥青含量较多;MA、SBSMA表面出现较多沥青胶浆裹覆不匀的情况,部分集料没有被胶浆充分裹覆,出现胶浆聚集。MA、SBSMA中,自由沥青胶浆含量高于MFMA,结构沥青胶浆含量低于MFMA。SBS改性剂两端的聚苯乙烯在沥青中形成网架结构,增大了沥青的内黏聚力,同时加强了沥青-集料界面的内摩擦角。因此,SBSMA的内黏聚力和内摩擦角仅次于MFMA,MA的内黏聚力和内摩擦角最小。

水对沥青混合料内黏聚力和内摩擦角的影响机

理见图4。由图4可见,这一过程分为形成扩散通道和水分子在沥青膜中扩散2个阶段,且前一阶段速率较慢^[11-12]。当水膜包裹沥青混合料时,水分子会与沥青中的极性分子(基团)通过取向力发生作用;水分子与沥青中非极性组分可通过诱导力进行作用并形成微活化中心,还可与沥青中电负性大的O、N杂原子形成氢键。在这3种分子力作用下,微活化中心会形成水分渗入沥青膜的毛细管道,造成沥青膜的“乳化”,进而导致沥青胶浆的内黏聚力降低^[13]。当“乳化”发展加剧,毛细管道到达沥青-集料界面时,水分子会沿着沥青-集料界面横向扩散,形成沥青-水-集料三相界面,从而降低了沥青混合料的内摩擦角。

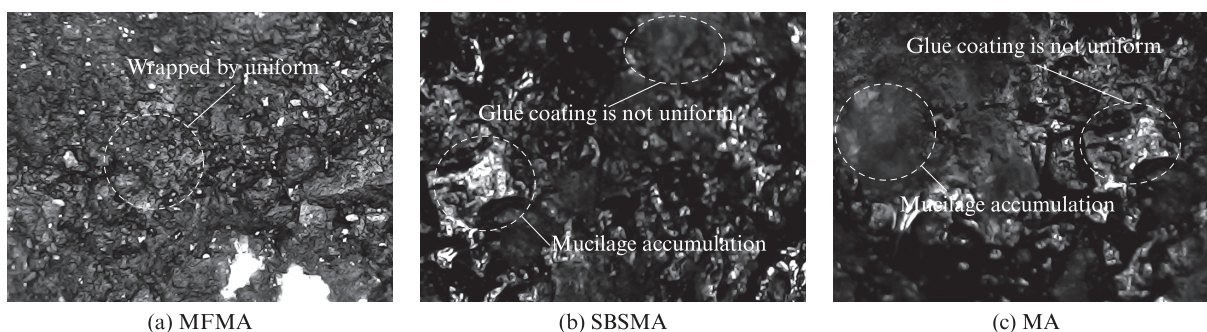


图3 沥青混合料表面的显微镜照片

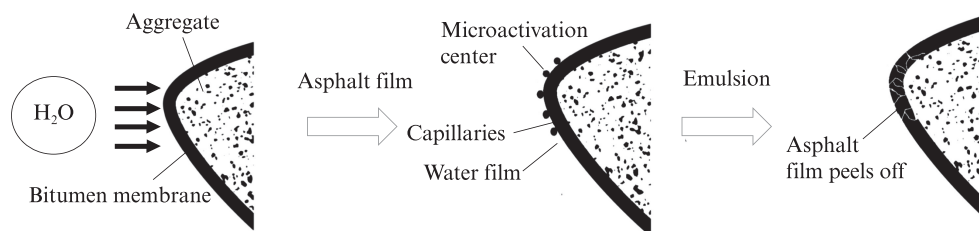
Fig. 3 Microscope photos of asphalt mixture surface(500 $\times$)

图4 水对沥青混合料内黏聚力和内摩擦角的影响机理

Fig. 4 Influence mechanism of water on c and φ of asphalt mixture

结合图2~4可以看出:多功能改性沥青胶浆包裹均匀,没有出现集料裸露,大部分为黏结较紧密的结构沥青,而极性分子在集料表面取向,在分子作用力与极性吸附作用下增强沥青胶浆与集料的吸附,且多功能改性剂中超支化聚合物可以氧化轻质组分,在混合料表面形成致密、高硬度的氧化层,因此水分子对MFMA影响的第1阶段开展极为缓慢;多功能改性剂在高温拌和时黏性较低,使MFMA最为密实,进水量最少,受到水温耦合作用影响最小;多功能改性剂在中温60℃时具有增黏的作用,所以MFMA内黏聚力和内摩擦角的下降幅度极为有限,几乎不受影响;SBSMA的施工和易性要差于MA,其拌和温度较MA高10℃,因此在相同拌和温度与击实功下,SBSMA均匀性最差,导致其内黏聚力和内摩擦角先于MA下降,而在其集料裸露、沥青膜较薄弱部分被水分子浸润后,胶浆包裹严密部分的抗水损效果较好,其内黏聚力和内摩擦角的下降速率迅速得到控制,而MA则出现持续下降。

2.3 车辙试验结果分析

通过车辙试验,得到不同饱水率试件的动稳定度(DS),结果见图5。由图5可见:随着试件饱水率的增大,MA的DS下降了41.86%;SBSMA的DS下降了31.70%;MFMA的DS下降不明显,总体仅下降了3.63%。由于水在沥青膜中的扩散削弱了沥青胶浆的内黏聚力和内摩擦角,且基质沥青、SBS改性沥青胶浆出现聚集,对集料包裹不均匀,使水更容易扩散到集料表面,使沥青混合料内黏聚力和内摩擦角的削弱加剧,因此其动稳定度下降幅度较大。多功能改性沥青对集料包裹均匀,且内黏聚力和内摩擦角基本不受水的影响,因此其动稳定度仍保持较高水平。

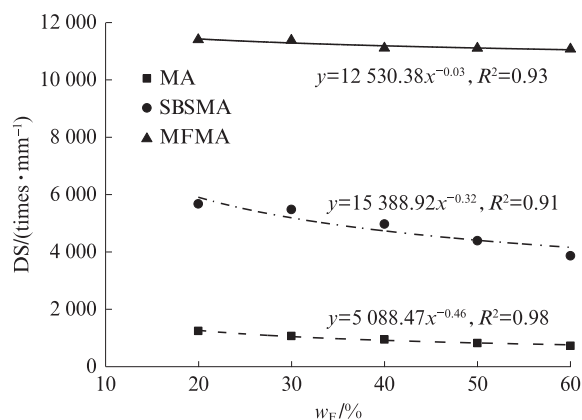


图5 不同饱水率试件的动稳定度

Fig. 5 DS of specimens with different w_F

2.4 动稳定度与内黏聚力、内摩擦角的关系

为验证参数的相关性及其显著性^[14],对沥青混合料的动稳定度、内黏聚力和内摩擦角进行曲面拟合,结果见图6。由图6可见:随着内黏聚力和内摩擦角的降低,沥青混合料受到的水温耦合作用逐渐增强,其动稳定度随内黏聚力和和内摩擦角的降低而降低;MA的动稳定度受内黏聚力变化的影响大于内摩擦角的影响;SBSMA的动稳定度较MA提高了近5倍,其动稳定度受内黏聚力变化的影响程度远大于内摩擦角的影响;MFMA的动稳定度基本不受水温耦合作用的影响,近似保持平面。综上,为保证沥青混合料在高温多雨条件下的路用性能,可以通过提高其内黏聚力和内摩擦角来实现。沥青混合料在采用相同级配时,其动稳定度受内黏聚力的影响明显大于内摩擦角的影响,因此在提高沥青混合料高温稳定性时,可优先考虑增大并保持混合料的内黏聚力。

各参数的相关性 R 及显著性 p 结果见表2,表中 F_s 为试件的抗剪强度。由表2可见:沥青混合料内黏聚力和内摩擦角与动稳定度指标具有显著的相关性,动稳定度受内黏聚力和内摩擦角影响较大;MA与SBSMA的动稳定度与其他变量的相关性排序为抗剪强度>内黏聚力>内摩擦角,其相关性 R 均在0.9以上;基质沥青混合料的动稳定度与抗剪强度、内黏聚力的显著性 p 均在0.01以下,表现为极显著,动稳定度与内摩擦角的显著性 p 在0.05以下,表现为显著;SBSMA的显著性较MA更强,其抗剪强度、内黏聚力与内摩擦角的显著性 p 远小于0.01,表现为极显著;MFMA的动稳定度与其他变量的相关性排序为内摩擦角>抗剪强度>内黏聚力,相关性较MA与SBSMA降低明显,显著性 p 在0.05以下,表现为显著。

为简化方差计算,将沥青混合料在不同饱水率下动稳定度与干燥条件下的动稳定度之比定义为干湿动稳定度比。以干湿动稳定度比作为响应变量,以饱水率和混合料类型作为影响因素 X_1 、 X_2 ,预设显著性 $p=0.05$,对试验结果进行二维方差分析,结果见表3,表中 D_f 为自由度, F 为 X_1 、 X_2 均方值的比值。由表3可见:饱水率的 $p<0.01$,表明饱水率对混合料干湿动稳定度比影响为极显著,水对沥青混合料高温稳定性有极大影响,在进行沥青混合料高温稳定性设计时需考虑水的存在;不同类型混合料的 $p<0.01$,表明不同类型混合料对干湿动稳定度比影响为极显著,验证了前文抗水温耦合作用MFMA>SBSMA>MA的排序。

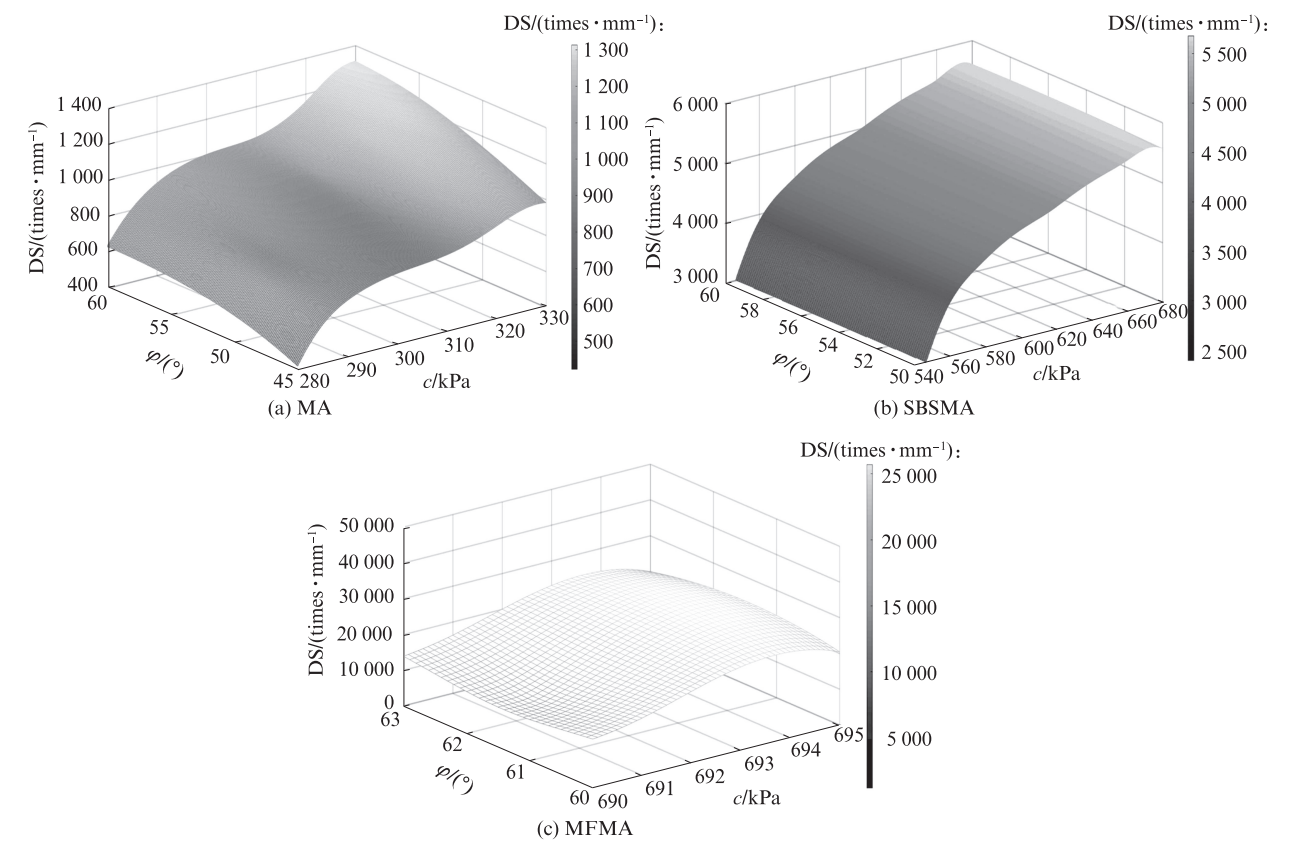


图6 沥青混合料的动稳度、内摩擦力和内摩擦角的拟合曲面图
Fig. 6 Fitting surface diagram of DS, c , φ of asphalt mixtures

表2 各参数的相关性及显著性
Table 2 R and p of different parameters

Mixture	Parameter	R				p			
		c	φ	F_s	DS	c	φ	F_s	DS
MA	c		0.857 1	0.978 7	0.964 8		0.002 7	0.000 7	0.001 8
	φ	0.857 1		0.905 3	0.903 5	0.002 7		0.013 0	0.013 5
	F_s	0.978 7	0.905 3		0.984 8	0.000 7	0.013 0		0.000 3
	DS	0.964 8	0.903 5	0.984 8		0.001 8	0.013 5	0.000 3	
SBSMA	c		0.897 8	0.990 4	0.988 3		0.001 2	0.000 1	0.000 2
	φ	0.897 8		0.981 4	0.943 2	0.001 2		0.000 1	0.000 5
	F_s	0.990 4	0.981 4		0.999 7	0.000 1	0.000 1		0.000 1
	DS	0.988 3	0.943 2	0.999 7		0.000 2	0.000 5	0.000 1	
MFMA	c		0.940 8	0.932 6	0.808 4		0.005 2	0.006 7	0.041 5
	φ	0.940 8		0.964 9	0.950 5	0.005 2		0.001 8	0.013 6
	F_s	0.932 6	0.964 9		0.899 5	0.006 7	0.001 8		0.014 6
	DS	0.808 4	0.950 5	0.899 5		0.041 5	0.013 6	0.014 6	

表3 方差分析表
Table 3 Analysis of variance

Source	Sum of square	D_f	Mean square	F	p
X_1	18 016.94	14.00	1 286.92	540.72	0.004 1
X_2	4.75	2.00	2.38		0.000 2
Error	5.67	28.00	0.20		
Sum	18 027.36	44.00			

3 结论

(1)通过真空饱水试验,得到了多功能改性沥青混合料、SBS改性沥青混合料和基质沥青混合料在不同时间下的饱水率.180 s时,多功能改性沥青混合料饱水率稳定在61%左右,SBS改性沥青和基质沥青混合料饱水率稳定在78%左右.

(2)SBS改性沥青混合料和基质沥青混合料胶浆包裹不均匀,水对SBS改性沥青混合料和基质沥青混合料内黏聚力和内摩擦角有重要影响,进而降低了混合料动稳定度,使其动稳定度、内黏聚力和内摩擦角随饱水率增大而降低。

(3)多功能改性沥青混合料的动稳定度、内黏聚力和内摩擦角几乎不受饱水率变化的影响,其内黏聚力还出现了小幅上升,这是因为多功能改性剂的中温增黏作用,使混合料高温稳定性提升,表现出了极强的抗水耦合作用的特性。

(4)沥青混合料动稳定度随饱水率增大而降低,在级配相同时,混合料动稳定度受内黏聚力变化的影响大于内摩擦角的影响,因此为提高沥青混合料高温稳定性,应优先考虑采用多功能改性沥青,以提高并保持混合料的内黏聚力。

参考文献:

- [1] 李辉,张久鹏,黄晓明. 沥青混合料高温稳定性的单轴静载蠕变试验[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2006, 27(3): 48-51, 108.
LI Hui, ZHANG Jiupeng, HUANG Xiaoming. Uniaxial static load creep test of high temperature stability of asphalt mixture[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2006, 27(3): 48-51, 108.(in Chinese)
- [2] 尹翔,卢天翔,宗炜,等. 基于浸水车辙试验的沥青混合料高温性能研究[J]. 北方交通, 2015(9): 47-50.
YIN Xiang, LU Tianxiang, ZONG Wei, et al. Study on high-temperature performance of asphalt mixture based on immersion rutting test [J]. Northern Communications, 2015 (9): 47-50.(in Chinese)
- [3] 栗培龙,张争奇,王秉纲. 沥青混合料高温蠕变变形行为及机理[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 422-426.
LI Peilong, ZHANG Zhengqi, WANG Binggang. High-temperature creep deformation behavior and its mechanism of asphalt mixture [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(3): 422-426.(in Chinese)
- [4] 蒋振雄.SBS改性沥青指标体系研究综述[J]. 公路, 2019, 64(10): 272-277.
JIANG Zhenxiong. Review on index system of SBS modified asphalt[J]. Highway, 2019, 64(10): 272-277.(in Chinese)
- [5] QIAN C, FAN W. Evaluation and characterization of properties of crumb rubber/SBS modified asphalt [J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 253:123319.
- [6] 陈亚雄,陈国平,陆慰慰. 多功能沥青改性剂的作用机理及路用性能评价[J]. 石油沥青, 2021, 35(4): 47-52.
CHEN Yaxiong, CHEN Guoping, LU Weiwei. Action mechanism and road performance evaluation of multifunctional asphalt modifier [J]. Petroleum Asphalt, 2021, 35(4): 47-52.(in Chinese)
- [7] LI J, YANG S, LIU Y, et al. Studies on the properties of modified heavy calcium carbonate and SBS composite modified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2019, 218: 413-423.
- [8] 黄晓明,范要武,赵永利,等. 高速公路沥青路面高温车辙的调查与试验分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(5): 16-20.
HUANG Xiaoming, FAN Yaowu, ZHAO Yongli, et al. Investigation and test of expressway asphalt pavement high-temperature performance [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(5): 16-20. (in Chinese)
- [9] 毕玉峰,孙立军. 沥青混合料抗剪试验方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(8): 1036-1040.
BI Yufeng, SUN Lijun. Research on test method of asphalt mixture's shearing properties [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(8): 1036-1040.(in Chinese)
- [10] 李明月. 基于马歇尔试件单轴贯入的沥青混合料高温稳定性试验方法研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
LI Mingyue. Research on uniaxial penetration test of asphalt mixture at high temperature stability based on marshall specimens [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [11] 魏建明. 沥青、集料的表面自由能及水分在沥青中的扩散研究[D]. 青岛:中国石油大学, 2008.
WEI Jianming. Study on surface free energy of asphalt, aggregate and moisture diffusion in asphalt [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008. (in Chinese)
- [12] 成志强,张晓燕,孔繁盛. 水分在沥青膜中的扩散特征研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 399-404.
CHENG Zhiqiang, ZHANG Xiaoyan, KONG Fansheng. Moisture diffusion property into asphalt film [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 399-404.(in Chinese)
- [13] 韩海峰,吕伟民,何桂平. 水作用下沥青混合料永久变形特性的表现形式[J]. 中国公路学报, 2003(4): 5-9.
HAN Haifeng, LÜ Weimin, HE Guiping. Effects of water on permanent deformation potential of hot-mix asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003(4): 5-9.(in Chinese)