

文章编号:1674-599X(2022)03-0011-08

降黏温拌沥青混合料路用性能研究

石宜清¹,李文凯²,邵景干²,刘向杰³

(1.河南省交通规划设计研究院股份有限公司,河南 郑州 450000;2.河南交院工程技术集团有限公司,河南 郑州 450000;
3.河南交通职业技术学院,河南 郑州 450015)

摘要:为降低沥青路面的施工温度,减少能源消耗及环境污染,路面施工常在沥青混合料中掺入降黏剂。本研究选用EC120、Sasobit两种降黏剂展开研究,通过黏度试验确定70[#]A级道路石油沥青中EC120的推荐掺量为3.5%,SBS改性沥青中EC120、Sasobit的推荐掺量均为3%,并将这两种降黏剂按推荐掺量分别对AC-13C、SMA-13混合料开展路用性能试验。研究结果表明:掺入降黏剂后,两种混合料的高温抗车辙、抗水损害及抗疲劳性能均得到显著改善,SMA-13混合料的低温抗开裂性能有小幅降低,但仍能满足改性沥青混合料的技术指标要求。

关键词:降黏剂;温拌沥青;矿料级配;油石比;路用性能

中图分类号:U414

文献标识码:A

Study on road performance of viscosity reducing warm mix asphalt mixture

SHI Yiqing¹, LI Wenkai², SHAO Jinggan², LIU Xiangjie³

(1.Henan Communications Planning & Design Institute Co.,Ltd., Zhengzhou 450000, China;
2.Henan Jiaoyuan Engineering Technology Group Co.,Ltd., Zhengzhou 450000, China;
3.Henan College of Transportation, Zhengzhou 450015, China)

Abstract:To reduce the construction temperature of asphalt pavement, reduce energy consumption and environmental pollution, warm mix asphalt mixture technology is introduced. At home and abroad, the exploratory research on reducing the construction temperature of asphalt pavement by adding viscosity reducer has been carried out.If it was not used properly, it would seriously affect the road performance of asphalt pavement. In this pstudy, two kinds of viscosity reducer EC120 and Sasobit were selected to carry out research. Through viscosity test, it was determined that the optimum content of EC120 in 70[#]A road asphalt is 3.5%, and the optimum content of EC120 and Sasobit in SBS modified asphalt is 3%; The road performance tests of AC-13C and SMA-13 mixtures were carried out at the optimum dosage of EC120 and Sasobit. The results showed that the high temperature rutting resistance, water damage resistance and fatigue performance of the two mixtures are significantly improved, and the low temperature cracking resistance of SMA-13 mixture is slightly reduced.However, it can meet the technical index requirements of modified asphalt mixture.

Key words:viscosity reducing;warm mix asphalt;aggregate gradation; oil stone ratio; road performance

沥青路面具有易施工、行车舒适性好及养护成本低等优点而被广泛应用。在热拌沥青混合料施工过程中,骨料与沥青的加热温度往往超过150℃,易造成沥青高温老化,消耗大量能源,同时还会产

生大量有害气体污染环境,严重危害作业人员的身心健康。温拌沥青混合料可以降低混合料的施工温度,减少有害气体排放,节约能源消耗。已有许多学者对温拌沥青进行了研究。赵军辉等人^[1]深度

收稿日期:2021-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408553);河南省重点科技攻关计划项目(152102210033)

作者简介:石宜清(1975—),男,河南省交通规划设计研究院股份有限公司高级工程师。

分析了Sasobit蜡、PE蜡的掺入对温拌沥青混合料路用性能的影响。郭彦强^[2]于2019年研发了温度实时监测设备,对温拌沥青混合料的温度进行监测,研究表明温拌技术可以降低施工温度。于晓东^[3]利用压实能量及交通密实指数对温拌沥青混合料进行分析,得出最佳的施工温度。陈瑞璞等人^[4]研发出了HH-X温拌剂,能够有效地改善温拌沥青混合料的水稳定性及抗疲劳性能,并结合工程案例提出了施工技术指标和质量提升方法。赵富强等人^[5]将Sasobit降黏剂掺入沥青混合料中,并研究其路用性能,重点分析了Sasobit降黏剂降低施工温度的能力。王岚等人^[6]研究了Sasobit、AM6505降黏剂对沥青路面长期路用性能的影响,结果表明温拌沥青路面的水稳定性及抗疲劳性均比热拌混合料路面的好。寇洪源^[7]对温拌沥青路面全寿命周期的性能进行了跟踪监测,得出了温拌沥青路面能带来巨大经济效益且能减少环境污染的结论。本研究选用EC120、Sasobit两种降黏剂进行试验,分析其对70#A级道路石油沥青的、SBS改性沥青的黏度以及AC-13C、SMA-13两种混合料的路用性能的影响,为温拌沥青路面在工程中的应用提供理论基础。

1 原材料

1.1 沥青

本研究选用许昌金欧特沥青股份有限公司生产的70#A级道路石油沥青及SBS聚合物改性沥青,两种沥青主要技术指标及试验结果分别见表1~2。

表1 70#A级道路石油沥青主要技术指标试验结果

Table 1 Test results of main technical indexes of the 70#A grade road asphalt

检测项目	试验结果	技术要求
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	69	60~80
软化点/°C	51.5	≥46
延度(10 cm/min, 5 °C)/cm	38	≥20
延度(15 cm/min, 5 °C)/cm	107	≥100
闪点/°C	274	≥260
60 °C动力黏度/(Pa·s)	186.37	≥180
溶解度/%	99.8	≥99.5
质量变化/%	-0.25	±0.80
RTFOT后残留物的针入度比(25 °C)/%	68	≥61
残留延度(15 °C)/cm	23	≥15

表2 SBS聚合物改性沥青主要技术指标试验结果

Table 2 Test results of main technical indexes of polymer modified asphalt

检测项目	试验结果	技术要求
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	52	40~60
软化点/°C	66.5	≥60
延度(5 cm/min, 5 °C)/cm	25	≥20
闪点/°C	242	≥230
弹性恢复(25 °C)/%	83	≥75
135 °C运动黏度/(Pa·s)	2.21	≤3
溶解度/%	99.4	≥99
质量变化/%	-0.13	±1.0
RTFOT后残留物的针入度比(25 °C)/%	72	≥65
RTFOT后残留物的残留延度(5 °C)/cm	21	≥15

1.2 降黏剂

降黏剂多为石油加工过程中的衍生物,与沥青具有较好的相容性。降黏剂不仅可以提高沥青路面的路用性能,还能降低施工温度,减少能源消耗。本研究选用EC120、Sasobit两种降黏剂,其中,EC120由深圳海川新材料科技股份有限公司生产,Sasobit由德国Sasol-Wax公司研发。两种降黏剂主要技术指标试验结果见表3。

表3 两种降黏剂主要技术指标试验结果

Table 3 Test results of main technical indexes of two viscosity reducers

降黏剂	135 °C		25 °C密度/ (g·cm ⁻³)	25 °C		65 °C	
	黏度/ (Pa·s)	熔点/ °C		闪点/ °C	针入度/ (0.1 mm)	针入度/ (0.1 mm)	
Sasobit	0.018	96.5	0.96	291	<1	8	
EC120	0.023	94.0	0.94	294	<1	10	

2 温拌改性沥青试验

2.1 温拌改性沥青的制备

EC120、Sasobit两种降黏剂的熔点均未超过100 °C,而在沥青原材料试验过程中加热,温度会超过130 °C,在该温度下两种降黏剂会快速融化,因此EC120、Sasobit的温拌沥青易于制备。为使降黏剂均匀分散,本研究选用叶片式沥青搅拌器制备温拌改性沥青试样,操作步骤为:

1) 将70#A级道路石油沥青及SBS改性沥青放入不同烘箱内,分别加热至135、145 °C;

2) 将流动状态的沥青倒入容器,然后按照掺配比例分别加入EC120、Sasobit降黏剂,用搅拌器在设定温度下对该试样高速剪切30 min,最后在室温

下静置2 h。

2.2 黏度试验

黏度是指材料熔融状态下的黏滞性,可反映分子之间摩擦力的大小,沥青的黏度与沥青路面的性能关系密切。良好的黏温性能可以保证沥青路面有较好的高温抗车辙、低温抗开裂性能。同时沥青的黏度温度(以下简称黏温)决定沥青路面的施工温度,本研究将EC120、Sasobit两种降黏剂掺入到沥青中,研究温拌改性沥青的黏度和温度的规律,为温拌沥青路面施工温度的确定提供依据。选用布氏黏度试验,评价沥青黏度与试验温度及降黏剂掺量(占沥青质量的百分比)的变化关系。其中,转子型号为S27,扭矩百分数控制在10%~98%。对70#、70#+EC120、SBS、SBS+EC120、SBS+Sasobit沥青的黏度进行试验,黏温曲线试验结果如图1~3所示。

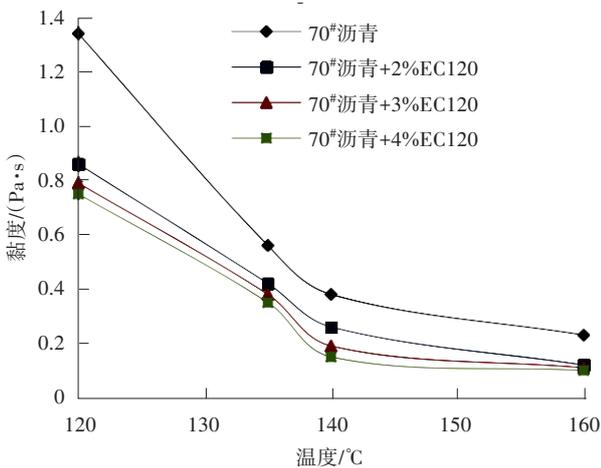


图1 70#+EC120温拌改性沥青的黏温曲线

Fig.1 Viscosity temperature curve of the 70# + EC120 warm mix modified asphalt

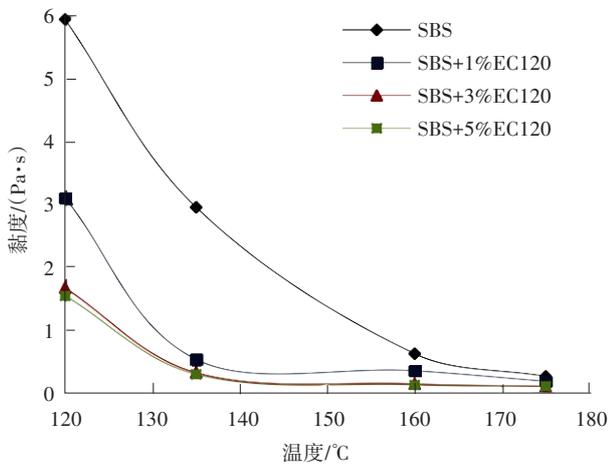


图2 SBS+EC120温拌改性沥青的黏温曲线

Fig.2 Viscosity temperature curve of the SBS + EC120 warm mix modified asphalt

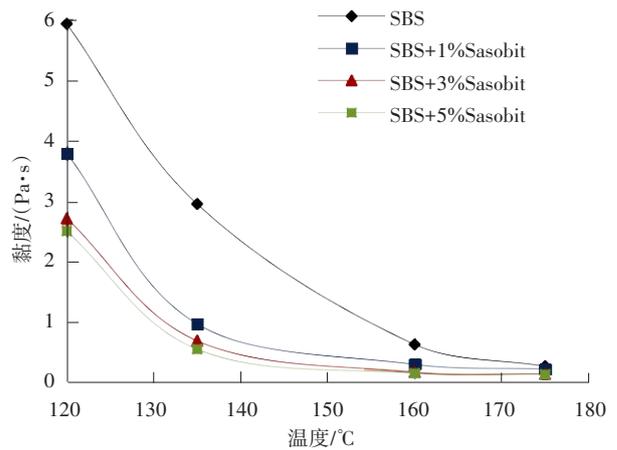


图3 SBS+Sasobit温拌改性沥青的黏温曲线

Fig.3 Viscosity temperature curve of the SBS + Sasobit warm mix modified asphalt

从图1可以看出,随着温度的升高,70#沥青及不同EC120掺量的70#沥青的黏度逐渐降低。温度超过140 °C时,其下降幅度均减小;相同温度时,随着EC120掺量的增加,其黏度逐渐降低。这表明:EC120的掺入,能够降低沥青路面的施工温度。当EC120掺量分别为3%、4%,温度超过140 °C,相同试验温度的加入不同掺量EC120的70#沥青黏度试验结果相差不大。为保证降黏效果,降低施工成本,EC120的推荐掺量为3.5%。

从图2~3可以看出,随着温度的升高,SBS沥青以及不同EC120、Sasobit掺量的SBS沥青黏度均逐渐降低。当温度超过135 °C时,其下降幅度均减小;相同温度时,随着EC120、Sasobit掺量的增加,其黏度逐渐降低。当EC120、Sasobit掺量分别为3%、5%时,温度超过140 °C,相同试验温度的SBS改性沥青黏度试验的结果接近,为了保证降黏效果,降低施工成本,EC120、Sasobit的推荐掺量均为3%。

2.3 黏度与施工温度的关系

通过测定不同温度下沥青的黏度,绘制黏温曲线,以黏度为(0.17±0.02) Pa·s时的温度作为混合料的拌和温度,以黏度(0.28±0.03) Pa·s时的温度作为压实成型温度^[8]。该方法用于改性沥青时,会导致混合料的施工温度偏高,但是目前还没有合适的方案。因此,在确定改性沥青混合料施工温度时,还应结合工程中的实践经验,确定合理的施工温度。

本研究通过对不同温度下的70#、70#+EC120、SBS、SBS+EC120、SBS+Sasobit沥青进行黏度试验,并结合实践经验,确定掺入适宜降黏剂时温拌沥青混合料的施工温度,试验结果见表4。

表4 不同沥青拌和及击实温度

Table 4 Different asphalt mixing and compaction temperature
°C

施工 温度	70 [#] 沥青	70 [#] + 3.5%EC120	SBS	SBS+ 3%EC120	SBS+ 3%Sasobit
拌和 温度	168±3	138±3	180±3	148±3	150±3
击实 温度	158±4	128±4	170±4	138±4	140±4

由表4可知,在70[#]沥青、SBS沥青中分别掺入推荐掺量的EC120,混合料拌和温度及击实温度均下降30℃左右;在SBS沥青中掺入推荐掺量的Sasobit,混合料拌和温度及击实温度均下降28℃左右。

3 路用性能

3.1 配合比设计

选用AC-13C、SMA-13两种矿料级配展开研究,两种混合料分别选用70[#]A级道路石油沥青、SBS改性沥青进行配合比设计。其中,粗集料分别为10~15、5~10和3~5 mm石灰岩碎石,细集料为0~3 mm机制砂,填料为石灰岩磨细的矿粉,粗、细集料及矿粉主要技术指标均满足JTG F40—2004的要求。两种混合料矿料级配设计结果分别见表5~6,最佳油石比及马歇尔试验结果见表7。

表5 AC-13C矿料级配设计结果

Table 5 Design results of the AC-13C aggregate gradation

混合料	类型	通过下列筛孔(mm)的质量分数/%								
		13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
AC-13C	上限	100.0	85.0	68.0	50.0	38.0	28.0	20.0	15.0	8.0
	下限	90.0	68.0	38.0	24.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0
	设计级配	94.3	78.9	53.6	37.2	28.7	20.3	15.8	11.3	6.7

表6 SMA-13矿料级配设计结果

Table 6 Design results of the SMA-13 aggregate gradation

混合料	类型	通过下列筛孔(mm)的质量分数/%								
		13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
SMA-13	上限	100.0	75.0	34.0	26.0	24.0	20.0	16.0	15.0	12.0
	下限	90.0	50.0	20.0	15.0	14.0	12.0	10.0	9.0	8.0
	设计级配	95.7	65.2	28.3	19.2	18.3	15.2	12.1	10.8	9.7

表7 最佳油石比及马歇尔试验结果

Table 7 Optimum oil stone ratio and the Marshall test results

混合料	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/%	稳定度/kN	流值/mm
AC-13C	4.7	2.452	4.71	15.1	69.5	11.87	3.4
SMA-13	6.1	2.441	3.56	17.8	80.2	9.68	4.2

3.2 混合料压实温度

在沥青混合料配合比设计中发现,精准选取拌和温度及击实温度对混合料质量极为重要^[9]。沥青路面施工过程中,温度的高低会严重影响沥青路面的摊铺、碾压后的质量。马歇尔毛体积相对密度是室内评价混合料击实效果的重要参数。本研究在不同击实温度下测定马歇尔试件的毛体积相对密度及空隙率,试验结果分别如图4~5所示。

从图4~5可以看出,随着击实温度的升高,不同混合料马歇尔毛体积相对密度逐渐增大,空隙率逐渐减小。当达到一定击实温度后,无论其增

大还是减小,空隙率均逐渐降低,该结果与沥青的黏温曲线相吻合。综合考虑各种因素,确定70[#]+AC-13C、70[#]+3.5%EC120+AC-13C、SBS+SMA-13、SBS+3%EC120+SMA-13、SBS+3%Sasobit+SMA-13沥青的击实温度分别为150、130、170、140和140℃,拌和温度在击实温度的基础上提高10℃。

3.3 水稳定性

该试验地区属于季节性多雨地区,沥青路面易出现水损害等常见的病害。沥青路面随着使用年限的增加,在外界因素下逐渐老化,在车辆轴载、雨水冲刷的作用下,沥青胶浆极易从骨料间剥落。松

散、坑槽等病害是沥青路面水稳定性差的主要表现形式^[10-12]。本研究选用浸水马歇尔及冻融劈裂试验,评价混合料的抗水损害性能,试验结果分别如图6~7所示。

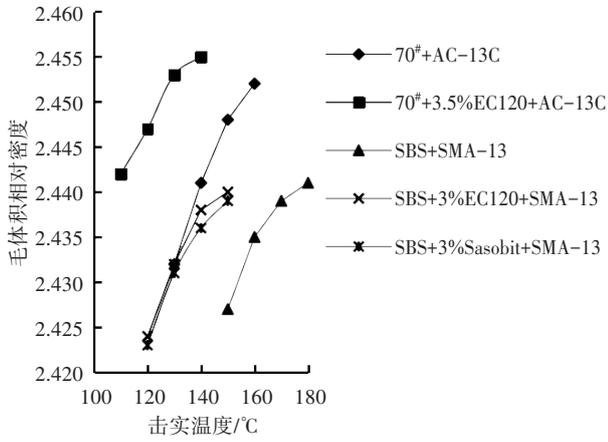


图4 毛体积相对密度与击实温度的关系

Fig.4 Relationship between relative density of bulk volume and compaction temperature

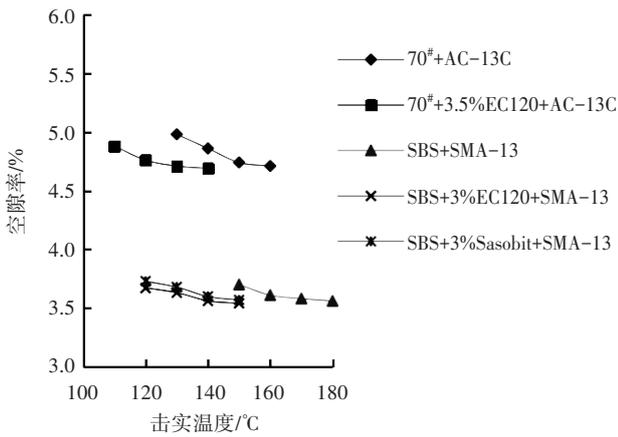


图5 空隙率与击实温度的关系

Fig.5 Relationship between porosity and compaction temperature

从图6~7可以看出,掺入降黏剂后,AC-13C、SMA-13两种混合料的浸水马歇尔残留稳定度及冻融劈裂残留强度比显著提高。其中,70[#]+3.5%EC120+AC-13C混合料抗水损害能力最优,而掺入3%EC120的SMA-13混合料的抗水损害能力比掺入3% Sasobit的好。由此推断,掺入降黏剂能够改善两种混合料的水稳定性能,其主要原因是降黏剂可以增加矿料之间沥青膜的厚度,增强沥青与矿料之间的黏附性,有效减缓水对沥青膜的破坏。

3.4 高温稳定性

高温环境下,沥青塑性增强,韧性降低。夏季高温天气,沥青路面结构层内部温度往往会高于

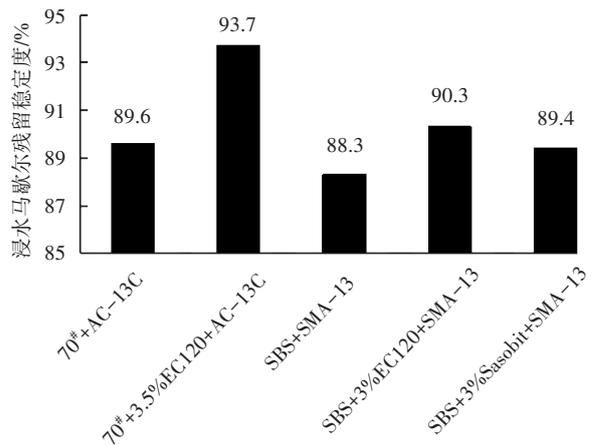


图6 浸水马歇尔残留稳定度试验结果

Fig.6 Test results of the immersion Marshall residue stability

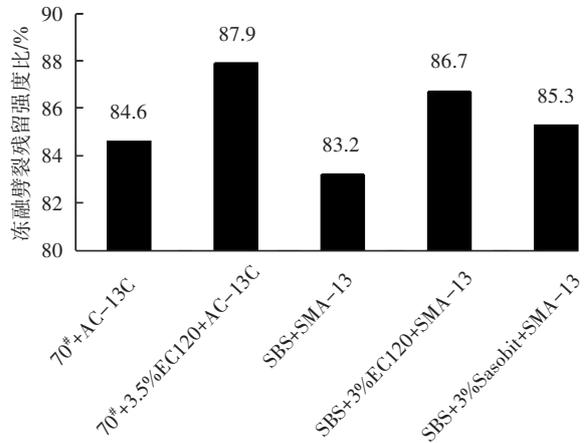


图7 冻融劈裂残留强度比试验结果

Fig.7 Test results of freeze thaw splitting residual strength ratio

60 °C,在车辆轴载作用下易出现塑性变形,形成车辙。车辙、拥包、推移及泛油是沥青路面高温稳定性差的主要表现形式^[13-16]。本研究选用室内车辙试验,评价混合料的高温抗车辙能力,动稳定度试验结果如图8所示。

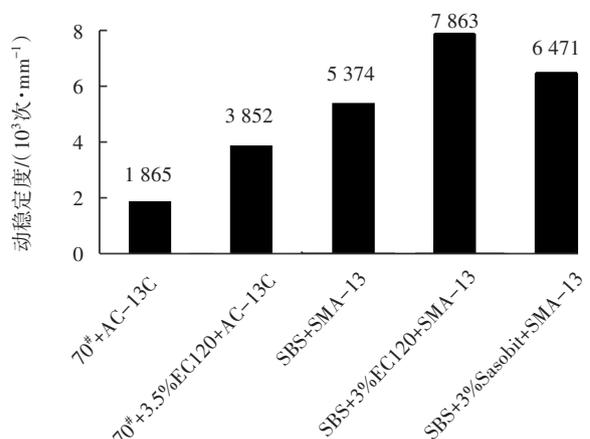


图8 动稳定度试验结果

Fig.8 Dynamic stability test results

从图8可以看出,掺入降黏剂后,AC-13C、SMA-13两种混合料动稳定度均显著提高。其中,SBS+3%EC120+SMA-13混合料的高温抗车辙能力最优;掺入3.5%EC120的AC-13C动稳定度提高了106.5%;掺入3%EC120、3%Sasobit的SMA-13动稳定度分别提高了46.3%、20.4%;两种降黏剂均能改善混合料的高温抗车辙能力。两者相比,EC120的改善效果更好。

3.5 低温抗裂性

低温环境下,沥青路面变得硬而脆,结构层内部易出现温缩裂缝,严重影响路面结构的连续性及其完整性,雨水通过缝隙渗透到路面基层,侵蚀路基,降低结构层的承载能力,也增加结构层遭受冻胀的风险^[17-19]。本研究选用-10℃低温小梁弯曲试验,评价混合料的低温抗开裂能力,弯曲破坏应变试验结果如图9所示。

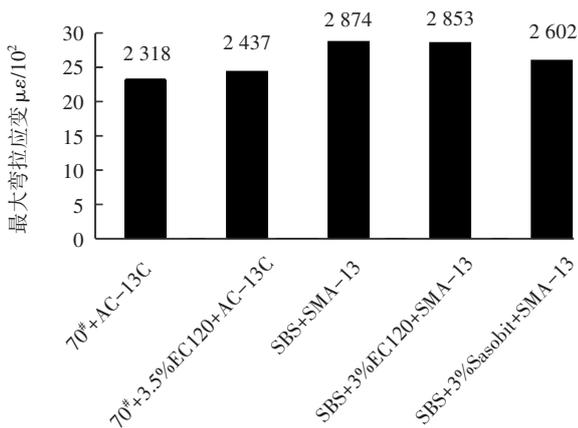


图9 最大弯拉应变试验结果

Fig.9 Test results of maximum bending tensile strain

从图9可以看出:掺入3.5%EC120的AC-13C混合料,其弯曲破坏应变有改善,但增加幅度仅为5.1%;掺入3%EC120、3%Sasobit的SMA-13混合料,其弯曲破坏应变分别降低了0.7%、9.5%,降低幅度不大,但均满足改性混合料不低于2500 $\mu\epsilon$ 的要求,结果表明降黏剂EC120对混合料低温抗开裂性能影响较小。

3.6 疲劳性能

沥青路面在运营过程中受到温度、雨水、紫外线及车辆轴载的综合作用,路面结构层长期处在应力、应变变化的环境中。当车辆轴载过大及作用次数过多时,沥青路面会因疲劳破坏而出现裂缝^[20]。本研究选用UTM-25疲劳试验机评价混合料的抗疲劳性能,小梁试件的尺寸为380 mm×50 mm×63 mm。

不同应力比的混合料疲劳次数试验结果如图10所示。

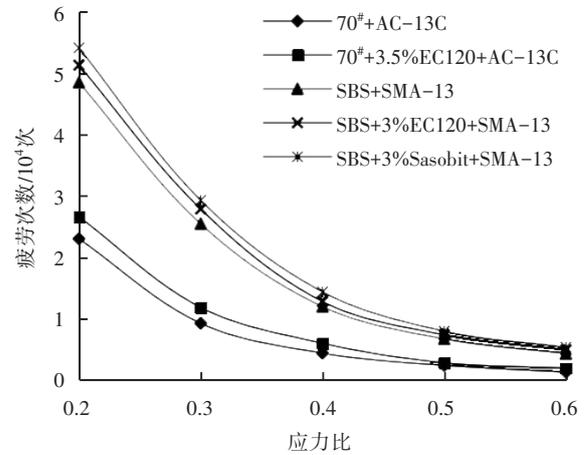


图10 疲劳次数与应力比的关系曲线

Fig.10 The relationship between fatigue times and stress ratio

从图10可以看出:随着应力比的增加,70#AC-13C、70#+3.5%EC120+AC-13C、SBS+SMA-13、SBS+3%EC120+SMA-13和SBS+3%Sasobit+SMA-13这5种混合料的疲劳次数逐渐降低,但降低幅度逐渐减小;相同应力比时,SMA-13混合料的疲劳次数显著高于AC-13C的;掺入两种降黏剂后,AC-13C、SMA-13的疲劳次数均增加了,其中,SBS+3%Sasobit+SMA-13混合料的抗疲劳性最好。

4 结论

本研究通过将EC120、Sasobit两种降黏剂掺入70#A级道路石油沥青及SBS改性沥青中进行沥青黏度试验,并按推荐掺量掺入两种降黏剂,对AC-13C、SMA-13两种混合料进行路用性能研究,得到以下结论:

1) 随着温度的升高,70#A级道路石油沥青、SBS改性沥青及不同EC120、Sasobit掺量的温拌沥青黏度逐渐降低;70#A级道路石油沥青中EC120推荐掺量为3.5%,SBS改性沥青中EC120、Sasobit推荐掺量均为3%;EC120、Sasobit掺入推荐掺量时,沥青混合料的拌和温度及击实温度均下降28~30℃。

2) 随着击实温度的升高,不同混合料马歇尔毛体积相对密度逐渐增大,空隙率逐渐减小。当达到一定击实温度后,变化幅度逐渐降低。

3) 在EC120、Sasobit两种降黏剂掺入推荐掺量时,AC-13C、SMA-13两种混合料的高温抗车辙、抗

水损害及疲劳性能均得到显著改善,70#+3.5% EC120+AC-13C混合料的低温抗开裂能力有大幅度增加,SBS+3%EC120+SMA-13、SBS+3% Sasobit+SMA-13混合料低温抗开裂能力有大幅度降低,但试验结果仍均可以满足改性沥青混合料不低于2 500 $\mu\epsilon$ 的要求。

参考文献(References):

- [1] 赵军辉.高速公路SMA沥青混合料路面施工技术[J].交通世界,2019(25):18-19.(ZHAO Junhui. Construction technology of SMA asphalt mixture pavement of expressway [J]. Transpo World, 2019(25):18-19. (in Chinese))
- [2] 郭彦强.离析类型和程度对沥青混合料性能的影响[J].内蒙古公路与运输,2019(1):34-37,43.(GUO Yanqiang. Influence of segregation type and degree on the performance of asphalt mixture [J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2019(1):34-37,43. (in Chinese))
- [3] 于晓东.橡胶沥青混合料的配制与应用[J].科学技术创新,2019(7):93-94.(YU Xiaodong. Preparation and application of rubber mixture [J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(7):93-94. (in Chinese))
- [4] 陈瑞璞,崔亚楠,冯蕾.老化作用下沥青混合料的疲劳及自愈性能[J].建筑材料学报,2019,22(3):487-492.(CHEN Ruipu, CUI Yanan, FENG Lei. Fatigue and self-healing properties of asphalt mixture under effect of aging [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3):487-492. (in Chinese))
- [5] 赵富强,罗要飞,方滢,等.反应型SBS复配高黏改性沥青研制与微观分析[J].公路,2019,64(7):238-246.(ZHAO Fuqiang, LUO Yaofei, FANG Ying, et al. Preparation of the reactive high viscosity modified asphalt with composite modifier and its microscopic characteristics [J]. Highway, 2019, 64(7):238-246. (in Chinese))
- [6] 王岚,王子豪,李超.多聚磷酸及多聚磷酸-SBS改性沥青低温性能[J].复合材料学报,2017,34(2):329-335.(WANG Lan, WANG Zihao, LI Chao. Low temperature performance of polyphosphoric acid asphalt and polyphosphoric acid-SBS modified asphalt [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(2):329-335. (in Chinese))
- [7] 寇洪源.就地热再生沥青混合料温度参数与性能的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2018.(KOU Hongyuan. Study on temperature parameter and performance of asphalt mixture using hot In-place recycling technology [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018. (in Chinese))
- [8] 赵普,高云龙,李明.温拌沥青混合料的可压实性及路用性能研究[J].城市道桥与防洪,2017(4):187-189,193,19.(ZHAO Pu, GAO Yunlong, LI Ming. Research on compactibility and pavement performance of warm mix asphalt mixture [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(4):187-189,193,19. (in Chinese))
- [9] 周沛延,程志豪,陈亮亮,等.拌和温度对温拌沥青混合料相关特性的影响研究[J].中外公路,2017,37(2):236-240.(ZHOU Peiyan, CHENG Zhihao, CHEN Liangliang, et al. Study on the influence of mixing temperature on related characteristics of warm mix asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(2):236-240. (in Chinese))
- [10] 雷谱春.温拌剂的开发及其沥青混合料性能的验证[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(12):86-90.(LEI Puchun. Development of warm mix additive and performance verification of asphalt mixture [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2017, 34(12):86-90. (in Chinese))
- [11] 郭小丽.温拌沥青混合料与热拌沥青混合料的性能对比分析[J].山西建筑,2018,44(14):121-122.(GUO Xiaoli. Comparison and analysis of the performance of warm mixed asphalt mixture and hot mix asphalt mixture [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(14):121-122. (in Chinese))
- [12] 彭莉,黄涛.多种温拌沥青混合料降温效果对比研究[J].西部交通科技,2017(8):36-40.(PENG Li, HUANG Tao. Comparative study on cooling effect of various warm-mix asphalt mixtures [J]. Western China Communications Science & Technology, 2017(8):36-40. (in Chinese))
- [13] 钱璞,李俊.硅藻土改性沥青混合料高温性能分析[J].中外公路,2017,37(5):281-284.(QIAN Pu, LI Jun. Analysis of high temperature performance of diatomite modified asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(5):281-284. (in Chinese))
- [14] 崩海东,张勇,董吉方,等.不同温度沥青混合料动稳定度试验研究[J].公路交通技术,2017,33(4):25-27.

- (KUI Haidong, ZHANG Yong, DONG Jifang, et al. Experimental study on dynamic stability of asphalt mixture under different temperature [J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33 (4) : 25-27. (in Chinese))
- [15] 何华, 沈昆, 李炜, 等. 硬质沥青混合料的路用性能研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2017, 13 (6) : 196-198. (HE Hua, SHEN Kun, LI Wei, et al. Study on road performance of hard asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2017, 13 (6) : 196-198. (in Chinese))
- [16] 李志刚. DXG-1 抗车辙剂沥青混合料路用性能研究 [J]. 河南科学, 2020, 38 (8) : 1264-1269. (LI Zhigang. The road performance of asphalt mixture with DXG-1 anti-rutting agent [J]. Henan Science, 2020, 38 (8) : 1264-1269. (in Chinese))
- [17] 孔令坤, 李文凯. 不同纤维沥青混合料性能研究 [J]. 河南科学, 2020, 38 (5) : 791-796. (KONG Lingshen, LI Wenkai. Study on the performance of different fiber asphalt mixture [J]. Henan Science, 2020, 38 (5) : 791-796. (in Chinese))
- [18] 陈安京. 温拌高模量沥青混合料性能试验研究 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2021, 18 (1) : 33-39. (CHEN Anjing. Experimental research on the performance of warm mix high-modulus asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (1) : 33-39. (in Chinese))
- [19] 代霞. 不同工艺制备的 SBS 改性沥青混合料性能研究 [J]. 公路与汽运, 2020 (6) : 53-56, 60. (DAI Xia. Study on performance of SBS modified asphalt mixture prepared by different processes [J]. Highways & Automotive Applications, 2020 (6) : 53-56, 60. (in Chinese))
- [20] 周彦黎. PR.P 高模量沥青混合料的动态模量及疲劳性能研究 [J]. 中外公路, 2017, 37 (6) : 292-295. (ZHOU Yanyun. Study on dynamic modulus and fatigue performance of PR. P high modulus asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37 (6) : 292-295. (in Chinese))
- (责任编辑: 刘国奇; 校对: 罗容 李脉; 英文编辑: 陈璐)

(上接第10页)

- Pute. Prospect of researches on soil stabilizer [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2006, 34 (2) : 141-146, 152. (in Chinese))
- [18] 黄伟, 张毫奎, 张丽, 等. 钢渣-杂填土基层材料配合比优化试验研究 [J/OL]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2021: 1-10. (2021-05-26). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210525.1312.008.html>. (HUANG Wei, ZHANG Maodie, ZHANG Li, et al. Experimental study on optimization of mix ratio for steel slag-miscellaneous fill base material [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021: 1-10. (2021-05-26). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210525.1312.008.html>. (in Chinese))
- [19] 交通部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [20] HUANG X, LI Z G, NING J G, et al. Principle and method of optimization design for soft soil stabilizer [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2009, 24 (1) : 154-160.
- [21] DEVENTER J, PROVVIS J L, DUXSON P, et al. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139 (3) : 506-513.
- [22] 张登良. 加固土原理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1990. (ZHANG Dengliang. Principle of reinforced soil [M]. Beijing: People's Communications Press, 1990. (in Chinese))
- (责任编辑: 刘平; 校对: 罗容 李脉; 英文编辑: 陈璐)