

## 高黏度改性沥青的研制及其 PAC-13 路用性能研究

郭小圣, 傅丽, 郭皎河, 王珂琦

(中国石化大连石油化工研究院, 辽宁 大连 116045)

**摘要:**为研制满足 JTG/T 3350-03-2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》技术要求的高黏度改性沥青,以中国石化“东海牌”沥青为基质料,通过控制变量法研究改性剂、稳定剂等对高黏度改性沥青性能的影响规律,并通过均匀设计试验对沥青改性工艺进行优化研究,最后采用 PAC-13 级配评价高黏度改性沥青的路用性能。结果表明:采用“东海牌”沥青通过“湿法”工艺制备的高黏度改性沥青可完全满足指标要求,其 60℃ 动力黏度大于  $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  且可根据需求进行定制调控,同时其 170℃ 布氏黏度较低,利于混合料拌和均匀;自主研发的 MAW-2 稳定剂不仅可使高黏度改性沥青储存稳定性满足指标要求,还可与聚合物改性剂协同提升沥青的动力黏度及其高温性能;当混合料空隙率为 20.3% 时,其马歇尔稳定度可达到 12.7 kN,20℃ 肯塔堡飞散损失和浸水飞散损失均较低,具有良好的高温稳定性,可有效防止排水沥青路面发生石料飞散等问题。

**关键词:**高黏度改性沥青; 60℃ 动力黏度; 稳定剂; 排水沥青混合料; PAC-13

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A

海绵城市是新一代城市雨洪管理概念,通常采用高空隙率排水沥青路面,将降雨透入到排水功能层横向排出并选择性收集储存,进而减少地表径流,最大限度地留住雨水,使城市在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”。目前广州、深圳等多个城市正大力推进海绵城市建设<sup>[1]</sup>。国内外大量工程实践表明,沥青胶结料的性能对排水沥青路面的质量和耐久性具有决定性作用。高黏度改性沥青作为排水沥青路面铺设中的关键材料,可以提高沥青混合料的抗车辙能力、抗水损坏能力和抗飞散病害能力,因此可以延长排水沥青路面的使用寿命。

JTG/T 3350-03-2020《排水沥青路面设计与施

工技术规范》<sup>[2]</sup>作为公路工程行业推荐性标准,已于 2020 年 9 月 1 日开始施行。该规范对高黏度改性沥青提出了更为严苛的技术要求,其中重要变化包括将 60℃ 动力黏度最低要求提升至  $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,并增加了储存稳定性离析 48 h 软化点差不大于 2.5℃ 等指标要求(主要指标详见表 1),这对过度依赖聚合物、树脂等成本高、稳定性差的沥青黏度提升方法提出了挑战。高黏沥青直投剂(干法)虽具有方便施工应用的优点,但存在价格昂贵、掺量高、拌和不易均匀等问题,在一定程度上限制了其应用和推广。

研究采用“湿法”工艺,利用中国石化“东海牌”石油沥青为原料,基于自主研发的 MAW-2 稳定剂,通

- \*\*\*\*\*
- [5] 交通部公路科学研究所. 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.
- [6] 交通部公路科学研究所. 公路工程集料试验规程: JTG E42-2005[S]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [7] 庄传仪. 基于加速加载响应的柔性基层沥青路面设计指标与参数研究[D]. 西安:长安大学,2012.
- [8] WANG Xinhao. Integrating GIS Simulation Models and Visualization in Traffic in Pact Analysis[J]. Computers Environment and Urban Systems,2005,29(4):471-496.
- [9] 于雷,郭朝阳,陈小兵,等. 橡胶沥青混合料动态模量及其

- 主曲线研究[J]. 中外公路,2015,35(2):203-207.
- [10] 张飞,王岚,邢永明. 温拌胶粉改性沥青混合料的动态模量[J]. 材料导报,2018,32(S2):476-483.
- [11] 李彩霞. 高模量沥青性能研究[J]. 中外公路,2018,38(5):253-256.
- [12] 沈路. 半柔性复合混凝土动态模量主曲线研究[J]. 中外公路,2019,39(5):272-275.
- [13] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用[M]. 北京:人民交通出版社,2006.
- [14] 黄筑江. 特立尼达湖沥青(TLA)改性沥青混合料的动态模量试验研究[J]. 中外公路,2017,37(3):247-252.

表 1 高黏度改性沥青技术要求<sup>[2]</sup>

指标	单位	技术要求
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	≥40
软化点( $T_{R\&B}$ )	℃	≥80
延度(5℃,5 cm/min)	cm	≥30
布氏黏度(170℃)	Pa·s	≤3
动力黏度(60℃)	Pa·s	≥5×10 <sup>4</sup>
黏韧性(25℃)	N·m	≥25
韧性(25℃)	N·m	≥20
储存稳定性离析,48 h 软化点差	℃	≤2.5
质量变化	%	≤±1.0
RTFOT 后残留物		
残留针入度比(25℃)	%	≥65
残留延度(5℃)	cm	≥20

过控制变量法和均匀设计试验,探索并深度优化高黏度改性沥青的工艺条件及物料配比,研发满足新规范要求的排水沥青路面用高黏度改性沥青,以期为中国海绵城市道路建设提供优质的沥青材料。

## 1 试验部分

### 1.1 材料与仪器

选取中国石化“东海牌”70<sup>#</sup> 沥青为基质沥青,性质如表 2 所示。改性剂为线型热塑性弹聚体(SBS),其嵌段比 S/B 为 30/70,拉伸强度≥16.0 MPa。增塑剂为芳香分含量>50%的油类物质,稳定剂 MAW-2 为自主研发产品,两者结合可有效促进聚合物分子的溶胀及其与沥青分子间的交联作用。

表 2 “东海牌”沥青性质

项目	单位	测试结果	
25℃针入度	0.1 mm	71	
软化点	℃	46.7	
10℃延度	cm	>100	
60℃动力黏度	Pa·s	204.9	
四组分	饱和分	%	11.71
	芳香分	%	49.70
	胶质	%	28.82
	沥青质	%	9.77
RTFOT (163℃,5 h)	质量变化	%	-0.087
	残留针入度比	%	66.2
	10℃残留延度	cm	8

试验仪器主要包括 Petrotest PNR 型 12 针入度

测试仪、Petrotest 型薄膜烘箱;WSY-025G 型全自动沥青软化点测定仪;CANNON CT-2000 型黏度测定仪;Axioskop 2 plus 型显微镜。

### 1.2 试验方法

将“东海牌”70<sup>#</sup> 沥青预热至 140~150℃,加入一定比例的增塑剂,持续机械搅拌后,将温度提升并加入适量 SBS、自主研发的稳定剂及其他助剂,在适宜条件下高速剪切、搅拌发育;最后,在发育阶段通过设有图像采集装置的光学显微镜观察添加剂分散状态,当添加剂分散均匀并发育至满足一定要求时结束试验,得到高黏度改性沥青。

### 1.3 性能测试

试验中采用的主要性能测试评价方法如下:

(1) 沥青胶结料:按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》标准方法对高黏度改性沥青胶结料进行测试,样品性质需满足 JTG/T 3350-03—2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》中对高黏度改性沥青的技术要求,如表 1 所示。

(2) 沥青混合料:采用 PAC-13 级配进行评价,性能需满足 JTG/T 3350-03—2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》中对排水沥青混合料的技术要求。

(3) 红外光谱测试:利用红外光谱仪(FT-IR)测试分析加入各改性剂后,沥青中官能团和分子结构的变化。

(4) 储存稳定性离析:JTG/T 3350-03—2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》对高黏度改性沥青的热储存稳定性做出了要求。研究采用软化点差值法来评价改性沥青热储存稳定性,试验温度为 163℃,储存时间为 48 h,要求上、下软化点差值不超过 2.5℃。

## 2 结果与讨论

### 2.1 工艺条件的优化

#### (1) 控制变量法

控制变量法是在研究和解决问题的过程中,对影响事物变化规律的因素或条件加以人为控制,使某些条件按照特定的要求发生变化或不发生变化,利于在研究过程中迅速找到事物变化发展的规律。该文采用控制变量法,通过系列试验分别考察关键组分聚合物 SBS、稳定剂 MAW-2 的掺入比例对高黏度改性沥青的黏度、延度、软化点等性能的影响规律。

在保持其他条件不变情况下,将高黏度改性沥青

中的 SBS 掺入比例从 4.5% 逐渐提升至 6.5%，并保持聚合物与稳定剂比例恒定，对沥青性质进行了全面测试，结果如表 3 所示。

表 3 SBS 掺量对高黏度改性沥青主要性能的影响

SBS 掺量/%	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	15℃ 延度/cm	60℃动力黏度/ (10 <sup>4</sup> Pa·s)
4.5	61	90.6	116	1.0
5.0	61	94.6	95	8.8
5.5	63	94.9	91	19.4
6.0	58	100.3	75	26.2
6.5	57	102.1	71	90.7

由表 3 可知：随着 SBS 掺入比例增加，高黏度改性沥青的针入度呈下降趋势，但总体变化不大，软化点从 90.6℃ 增至 102.1℃，呈现出较为明显的上升趋势，高温性能有所提升；15℃ 延度从 116 cm 降低至小于 80 cm，低温延展性衰减，表明应控制好 SBS 的加入量上限，使得高黏度改性沥青延度性质具备一定富余空间。当 SBS 掺入比例低于 5% 时，高黏度改性沥青的 60℃ 动力黏度较小，较难满足技术要求；当 SBS 掺入比例高于 5% 并逐渐增大时，沥青的 60℃ 动力黏度可满足大于  $5 \times 10^4$  Pa·s 的指标要求，且根据 SBS 掺入量的提高而逐渐增大。需要注意的是，当 SBS 掺入比例大于 6% 时，高黏度改性沥青的 60℃ 动力黏度呈现出指数型增长趋势，急速增至  $90.7 \times 10^4$  Pa·s，而过高的黏度使得沥青内聚力有较大幅度提升，一定程度上导致了其延伸度性能下降，因此该试验中 SBS 的掺量宜控制为 5%~6%。

保持 SBS 掺入比例等变量恒定，研究自主研发的 MAW-2 稳定剂掺入比例对高黏度改性沥青性质的影响规律。通过调控稳定剂的掺入比例为 0、0.15% 和 0.30%，重点考察沥青的延度、60℃ 动力黏度、软化点和离析软化点差等性能的变化规律，结果如表 4 所示。

表 4 MAW-2 稳定剂比例对高黏度改性沥青主要性能的影响

稳定剂比例/%	软化点/℃	60℃动力黏度/ (10 <sup>4</sup> Pa·s)	延度/cm		离析软化点差/℃
			15℃	5℃	
0	80.8	2.6	125	40	35.8
0.15	89.5	12.9	93	31	16.0
0.30	100.3	26.2	75	20	3.0

由表 4 可知：在不添加稳定剂的情况下，高黏度改性沥青的部分指标虽满足要求，但离析软化点差值较

高，不能满足新规范的稳定性要求，高黏度改性沥青易在生产运输中发生分层、变质等问题。随着稳定剂比例逐渐提升至 0.30%，高黏度改性沥青的离析软化点差显著降低至合格范围内，表明较小比例的 MAW-2 稳定剂对聚合物与沥青两相体系的相容及交联起到了积极的作用；同时，高黏度改性沥青的软化点、60℃ 动力黏度也都随着稳定剂比例的升高而显著增大，这主要是因为一定发育温度、时间条件下，MAW-2 稳定剂促使 SBS 与沥青进一步发生交联反应，增大了聚合物三维网状结构的强度，沥青分子间相对滑移受到更强的约束<sup>[3]</sup>，进而提升沥青的高温抗变形性能。同时，交联反应使沥青的状态由溶胶型向凝胶型转变，此时沥青具有较低的温度感应性，沥青整体刚性增强而塑性降低<sup>[4]</sup>，其高温抗车辙能力增强，但低温变形能力较差，导致了高黏度改性沥青低温延度在一定程度上受到负面影响，根据试验结果及生产经验，MAW-2 稳定剂掺量宜为 0.1%~0.5%，具体根据聚合物添加量来进行调控。

## (2) 均匀设计试验

均匀设计试验可通过科学合理的试验设计极大减少试验次数，判定考察因素的主次关系，从而确定最佳试验条件<sup>[5]</sup>。该文通过均匀设计试验对高黏度改性沥青的组分配方及工艺条件进行了深层次优化，以 SBS 掺入比例、稳定剂掺入比例、发育时间等关键条件作为考察因素，基于四因素八水平的  $U_8(8^3 \times 4)$  均匀设计方案进行高黏度改性沥青的优化试验，并针对得到的结果设计补充试验，最终得到了高黏度改性沥青的性能预测方程。利用预测方程，可在选定自变量约束区间、目标产品性质范围内，针对“东海牌”基质沥青选择最优的工艺条件及最低的配方成本，制备满足不同技术要求的高黏度改性沥青系列产品，其中典型的高黏度改性沥青(HV-22)常规性能如表 5 所示，沥青性质预测方程的验证结果如图 1 所示。

由表 5 可知：制备的高黏度改性沥青(HV-22)各指标均满足 JTG/T 3350-03-2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》相关技术要求，其储存稳定性较好，可达到成品普通改性沥青的稳定水平；在 60℃ 动力黏度大于  $10 \times 10^4$  Pa·s 情况下，沥青 170℃ 布氏黏度较低，利于排水沥青混合料的拌和施工；与对比沥青相比，在针入度更高的条件下，沥青的软化点及弹性恢复水平更高，表明其具有较强的高温抗形变性能和较宽的黏弹区间，而较高的 25℃ 黏韧性及韧性表明沥青对石料有较好的握裹力以及较强的内聚力，综合

表5 高黏度改性沥青典型样品性能

项目	单位	HV-22	对比沥青 1 <sup>[6]</sup>	对比沥青 2 <sup>[7]</sup>	JTG/T 3350- 03-2020 指标要求
25℃针入度	0.1 mm	70	47	43	≥40
软化点	℃	95.0	91.7	82.6	≥80
5℃延度	cm	41	23	70(15℃)	≥30
60℃动力黏度	Pa·s	11.9×10 <sup>4</sup>	12.2×10 <sup>4</sup>	3.7×10 <sup>4</sup>	≥5×10 <sup>4</sup>
170℃布氏黏度	Pa·s	0.73	4.0(135℃)	0.97(175℃)	≤3.0
闪点	℃	>260	—	—	≥230
25℃黏韧性	N·m	35.0	—	23.7	≥25
25℃韧性	N·m	25.4	—	21.8	≥20
弹性恢复	%	99.3	98.0	—	≥95
储存稳定性离析,48 h 软化点差	℃	0.5	—	2.6	≤2.5
残留针入度比	%	85.7	—	—	≥65
RTFOT 后    质量变化	%	-0.006	—	—	≤±1.0
残留5℃延度	cm	33	—	—	≥20

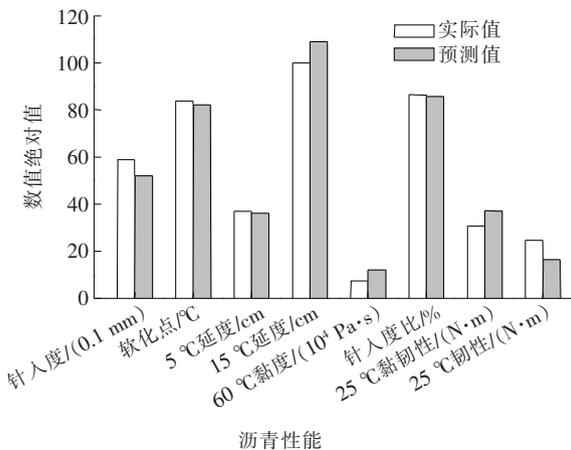


图1 高黏度改性沥青的性能预测验证结果

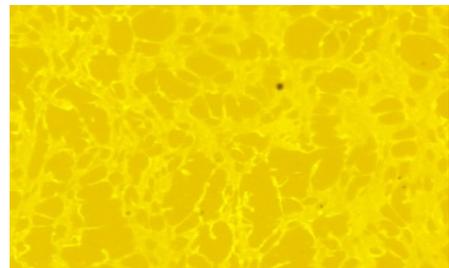
性能较好。同时,由图1可知:性质预测方程的误差较小,尤其是针入度、软化点、RTFOT后针入度比等性能,表明由均匀设计试验得到的性能预测方程具有较高的准确度。

## 2.2 微观机理研究

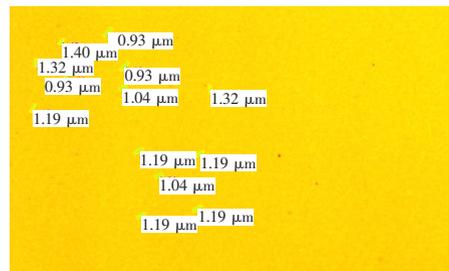
### (1) 微观相态结构分析

针对高黏度改性沥青的形成发育过程,采用高倍光学显微镜进行微观形态观察,放大倍数为200倍,结果如图2所示。

由图2(a)可知:当加入聚合物进行高频高强剪切20 min后,SBS分子链间仍未充分散开,具有较大尺寸;剪切后加入少量MAW-2稳定剂进行发育,沥青中的SBS颗粒逐渐细化、交联,改性剂颗粒尺寸达到微米级,发育60 min后改性剂颗粒尺寸达到1 μm左



(a) 剪切 20 min



(b) 发育 60 min

图2 高黏度改性沥青微观形态

右,具体见图2(b)。此种结构的形成将极大增强沥青分子间的内聚力,同时SBS与沥青间的表面张力及系统的吉布斯自由能降低<sup>[8]</sup>,高黏度改性沥青在一定程度上整体表现出聚合物的性质,对其路用性能的改善起到至关重要的作用;离析试验结果也表明,该状态下的产品储存稳定性十分优异,48 h离析软化点差值接近0。因此,通过上述方法观察微观相态,可有效指导制备储存稳定的高黏度改性沥青产品。

### (2) 红外光谱结构分析

利用红外光谱仪测试分析了加入改性剂后,沥青

中官能团和分子结构的变化(图 3)。

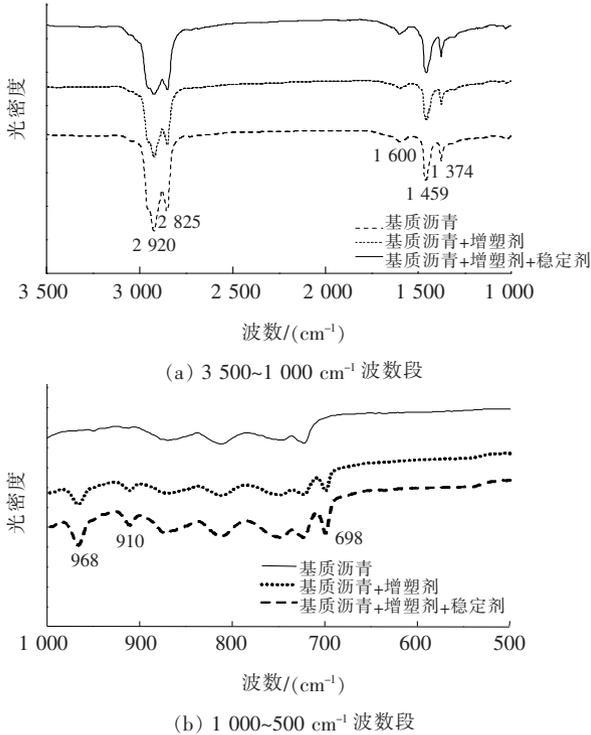


图 3 高黏度改性沥青 FTIR 图谱

由图 3 可知:在 3 500~1 000  $\text{cm}^{-1}$  波数段内,沥青的主要吸收峰包括 2 920  $\text{cm}^{-1}$  处脂肪族—CH<sub>3</sub>和—CH<sub>2</sub>—不对称伸缩振动形成的峰<sup>[9]</sup>,2 825  $\text{cm}^{-1}$ 处环烷烃和烷烃的 C—H 伸缩振动峰<sup>[10]</sup>,1 600  $\text{cm}^{-1}$ 处

C=C 伸缩振动峰,1 459  $\text{cm}^{-1}$  处—CH<sub>2</sub>—弯曲振动和—CH<sub>3</sub> 不对称弯曲振动叠加形成的峰,1 374  $\text{cm}^{-1}$  处—CH<sub>3</sub> 对称弯曲振动吸收峰,该峰为基质沥青特征峰,上述位置的峰说明沥青中含有较多长链烷烃、芳香族和碳氢化合物等成分。当加入改性剂及稳定剂后,研究发现该波数段内主要吸收峰位置并未发生变化,也未产生新的吸收峰。在 1 000~500  $\text{cm}^{-1}$  波数段内,加入改性剂后原有吸收峰虽未发生变化,但产生了多个新吸收峰,分别为 968  $\text{cm}^{-1}$  处聚丁二烯特征吸收峰,910  $\text{cm}^{-1}$  处—CH<sub>2</sub>—面外摇摆振动吸收峰以及 698  $\text{cm}^{-1}$  处聚苯乙烯特征吸收峰<sup>[11]</sup>,说明加入改性剂后 SBS 和沥青主要发生物理混合过程,未发生化学反应变化;加入稳定剂后,FTIR 谱图中未产生新的特征吸收峰,表明 MAW-2 稳定剂的加入有效解决了 SBS 聚合物与沥青间的热力学不相容的问题,其间并未使沥青内部产生新的化学官能团,更多的是促进 SBS 与沥青间发生交联作用,并使其在沥青中加速溶胀分散<sup>[12]</sup>。

### 2.3 混合料路用性能评价

#### (1) 配合比设计

试验采用 PAC-13 矿料级配,混合料空隙率需满足技术要求(18%~25%),矿料级配见表 6。通过马歇尔试验、析漏试验等确定了 PAC-13 排水沥青混合料配合比如表 7 所示。

表 6 PAC-13 的矿料级配

项目	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配	100	94.6	70.9	23.2	15.6	11.1	8.7	6.2	4.9	4.0
规范要求	100	90~100	60~80	12~30	10~22	6~18	4~15	3~12	3~8	2~6

表 7 PAC-13 排水沥青混合料的配合比设计

项目	沥青用量/%	空隙率/%	析漏质量损失/%	马歇尔稳定度/kN
体积参数	4.4	20.3	0.11	12.7
规范要求	—	18~25	≤0.8	≥5.0

由表 7 可见:PAC-13 排水沥青混合料空隙率(20.3%)和析漏质量损失(0.11%)等均符合 JTG/T 3350-03-2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》规定要求,尤其是马歇尔稳定度(12.7 kN)远高于指标要求,表明制备的沥青混合料具有较好的高温稳定

性能。

#### (2) 路用性能评价

欧洲研究表明:排水沥青路面发生飞散破坏的比重占有所有病害类型的 75%左右<sup>[2]</sup>。飞散及飞散引发的坑槽是排水沥青路面最容易出现的结构性破坏形式。该文对高黏度改性沥青混合料的路用性能进行了全面评价,包括高温性能评价、抗飞散性能评价等,结果如表 8 所示。

通过车辙试验测试了高黏度改性沥青混合料的高温稳定性,其动稳定度达到 8 253 次/mm,表明其具有良好的抗车辙能力;通过浸水马歇尔试验和冻融劈裂

表 8 PAC-13 排水沥青混合料性能评价结果

项目	肯塔堡飞散 损失/%	浸水肯塔堡 飞散损失/%	动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	渗水系数/ (mL·min <sup>-1</sup> )	浸水残留 稳定度/%	冻融劈裂残留 强度比/%
测试结果	13.0	10.0	8 253	5 060	92.2	86.3
对比沥青 <sup>[6]</sup>	14.5	19.2	6 373	—	87.4	84.0
规范要求	≤15	≤20	≥500	≥5 000	≥85	≥80

试验评价了沥青混合料的抗水损坏能力,冻融劈裂强度比为 86.3%,浸水残留稳定度为 92.2%,表明其具有良好的水稳定性;其 20℃肯塔堡飞散损失及浸水飞散损失分别为 13.0%和 10.0%,均优于对比的高黏高弹沥青,表明其抗飞散性能更优异;沥青混合料的渗水系数可达 5 060 mL/min,表明其具有良好的透水性。以上研究表明:高黏度改性沥青混合料的各项路用性能指标均满足现行相关标准规范技术要求,并具有较大富余量。

### 3 结论

(1) 采用控制变量法和均匀设计试验对高黏度改性沥青的制备工艺进行优化研究,结果表明随着 SBS 掺量的增加,沥青的高温性能与 60℃动力黏度均显著提高,而自主研发的 MAW-2 稳定剂可以显著提高沥青的储存稳定性及高温性能,同时应优化控制两者的掺量上限,否则将对沥青的低温延度性质产生负面影响。

(2) 采用中国石化“东海牌”沥青研制的高黏度改性沥青,各项技术指标均满足 JTG/T 3350-03-2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》中相关技术要求,其性能优于对比高黏高弹改性沥青。

(3) 采用 PAC-13 级配进行路用性能评价,结果表明研制的高黏度改性沥青混合料具有良好的抗飞散性能、高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性及渗水性能,满足交通运输部关于排水性沥青路面的铺筑要求。

### 参考文献:

- [1] 戴妍娇,焦胜,丁国胜,等.近十年海绵城市建设研究评述与展望[J].现代城市研究,2018,33(8):77-87.
- [2] 交通运输部公路科学研究院.排水沥青路面设计与施工技术规范:JTG/T 3350-03-2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [3] 司中向.聚合物硫磺改性沥青性能测试与评价[J].石油沥青,2015,29(4):52-55.
- [4] 袁中玉,张文刚,贾致荣,等.基于硫化机理的直投式乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物改性沥青稳定剂配方[J].科学技术与工程,2018,18(13):304-309.
- [5] 张国秋,王文璇.均匀试验设计方法应用综述[J].数理统计与管理,2013,32(1):89-99.
- [6] 袁野,杨成柱,陈彦忠.玛瑞原油生产和易性高黏高弹沥青的研究[J].石油沥青,2018,32(4):51-53.
- [7] 刘克非,朱俊材,张雪飞,等.氧化石墨烯改性沥青性能评价及其 OGFC 混合料路用性能[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(1):40-48.
- [8] 王明灿.SBS 改性沥青稳定性研究[D].西安:长安大学,2014.
- [9] HOU X D,LYU S T,CHEN Z,et al. Applications of Fourier Transform Infrared Spectroscopy Technologies on Asphalt Materials[J]. Measurement,2018,121:304-316.
- [10] 徐志荣,陈忠达,常艳婷,等.改性沥青 SBS 含量的红外光谱分析[J].长安大学学报(自然科学版),2015,35(2):7-12.
- [11] 郭小圣,郭皎河,李志军,等.红外光谱法表征 SBS 改性沥青研究进展[J].中国胶粘剂,2019,28(7):57-62.
- [12] 贾利强,刘俊斌,李平.高黏改性沥青的开发与性能评价[J].中外公路,2020,40(4):218-224.