

自反应型高模量沥青的技术性能评价

李炳南¹, 耿立涛^{2*}, 彭佳琳¹, 王凤姣¹, 徐万雷¹

1. 山东金日交通发展集团有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东建筑大学交通工程学院, 山东 济南 250101

摘要:为解决直投高模量沥青混合料技术存在的添加剂利用率低、混合料低温性能和疲劳性能差等问题,采用低密度乙烯-苯乙烯共聚物类高模量剂制备自反应型高模量沥青及其沥青混合料并评价其技术性能,在纯搅拌工艺下制备3种自反应型高模量沥青 HMB6、HMB7 和 HMB8,高模量剂在自反应型高模量沥青中的质量分数分别为6%、7%、8%,基于微观和理化特性分析高模量剂的分散状态及改性机理,结合宏观性能测试优选高模量剂的合理质量分数,以优选的自反应型高模量沥青 HMB7 制备并评价高模量沥青混合料的路用性能。结果表明:自反应型高模量沥青的改性过程为高模量剂的物理作用和其与沥青组分化学反应的综合结果;优选的高模量剂在沥青混合料中的质量分数为7%,为干法高模量剂用量的50%~80%,此时高模量剂的微观分散效果及低温性能较理想,且高温等级比采用传统高模量剂时提高1个等级;相应的高模量沥青混合料除高温性能优势外,其低温破坏应变比传统的干法高模量沥青混合料增大18%,疲劳寿命为后者的2~3倍。

关键词:低密度乙烯-苯乙烯;高模量剂;自反应型高模量沥青;微观性能;理化性能;路用性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2026)01-0073-07

引用格式:李炳南,耿立涛,彭佳琳,等. 自反应型高模量沥青的技术性能评价[J]. 山东交通学院学报,2026,34(1):73-79.

LI Bingnan, GENG Litao, PENG Jialin, et al. Performance evaluation of self-reactive high modulus asphalt [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2026, 34(1): 73-79.

0 引言

高模量沥青混合料的刚度显著高于传统的改性沥青混合料^[1-2],是解决重载、大交通量及交叉口沥青路面车辙病害的有效方案^[3-4]。目前,有3种制备高模量沥青混合料的方法:采用硬质道路石油沥青作为沥青混合料的胶结料^[5-7];将集料与高模量添加剂干拌后,再拌和普通道路石油沥青获得高模量沥青混合料(干法)^[8-9];以改性剂制备的高模量改性沥青作为沥青混合料的胶结料(湿法)^[10-12]。我国石化行业的道路沥青供给主要局限于普通标号产品,基于硬质沥青的高模量沥青混合料技术难于规模化应用;干法高模量沥青混合料工艺具有技术门槛低、无需制备改性沥青等优势,是目前国内工程中最普遍的方式,但存在添加剂利用率较低、混融效果较差及混合料低温性能和疲劳性能不佳问题^[13];湿法高模量沥青混合料工艺受改性技术制约,当改性剂成分、粒度与热物性指数不佳时,高模量沥青一般有低温性能较差、疲劳性能较差及较易离析等缺陷^[14]。湿法高模量沥青混合料技术具有充分发挥改性剂效果及规模化生产优势^[15-16],持续得到研究者关注,研究内容包括高模量添加剂与沥青的作用机理^[17]、硬质沥青与聚合物混配^[18]、对苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(Styrene-Butadiene-Styrene, SBS)改性沥青二次改性制备^[19]、施工工艺与标准编制^[20]等。提高高模量沥青的低温性能、简化制备工艺等均是湿法高模量沥青

收稿日期:2025-04-10

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2023ME037)

第一作者简介:李炳南(1982—),男,山东德州人,高级工程师,主要研究方向为路面材料,E-mail:32135143@qq.com。

*通信作者简介:耿立涛(1979—),男,辽宁法库人,教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为路面结构与材料,E-mail:glt@sdjzu.edu.cn。

混合料技术面临的主要技术问题。

本文采用低密度乙烯-苯乙烯共聚物作为高模量剂,在纯搅拌工艺下制备自反应型高模量沥青,测试并分析在高模量沥青中不同质量分数的高模量剂对高模量沥青的宏观性能、微观性能及流变性能的影响;采用优选配方的自反应型高模量沥青制备高模量沥青混合料,通过路用性能测试自反应型高模量沥青的使用效果,以期规模为应用自反应型高模量沥青提供参考。

1 原材料及高模量沥青的制备

采用自制的低密度乙烯-苯乙烯共聚物作为制备自反应型高模量沥青的高模量剂。由低密度乙烯、苯乙烯及羟基过氧化物助剂经负载型钛系催化剂引发共聚反应,采用挤出机造粒获得该共聚物,物理指标如表1所示。以齐鲁70#道路石油沥青作为制备自反应型高模量沥青的基质沥青,技术指标如表2所示。

表1 低密度乙烯-苯乙烯共聚物高模量剂的物理指标

密度/(g·cm ⁻³)	熔点/℃	粒径/mm	弯曲模量/MPa	介电常数 ^①	含水率/%
0.91~0.94	130~145	0.5~1.0	420	2.5	0.24

① 60 Hz, 20 ℃。

表2 齐鲁70#道路石油沥青的技术指标

针入度 ^① / (0.1 mm)	软化点/℃	延度 ^② /cm	延度 ^③ /cm	旋转黏度 ^④ / (Pa·s)	动力黏度 ^⑤ / (Pa·s)	质量相对 差 ^⑥ /%	针入度比 ^⑥ / %	残留延度 ^{⑥③}
64	47.5	脆断	34.7	0.49	189	-0.12	70.3	7.2

① 25 ℃, 100 g, 5 s。② 5 ℃, 5 cm/min。③ 10 ℃, 5 cm/min。④ 135 ℃。⑤ 60 ℃。⑥ 薄膜烘箱老化后。

由表1可知:共聚物刚度较大,可物理提高沥青的高温模量;共聚物中低密度乙烯链节具有柔性特征和低熔点特征,可赋予沥青低温柔性和韧性,在温度为170~180 ℃时迅速熔融、分散、解聚;同时,羟基过氧化物基团富含不饱和双键,可与沥青中的不饱和键及苯乙烯官能团发生交联反应,实现空间网络构建,进一步提高沥青的高温模量,存储稳定性较好。

通常制备改性沥青须经过基质沥青与改性剂共混剪切和加入硫磺类稳定剂搅拌发育2个阶段^[21]。剪切的作用是磨碎改性剂并促进其在沥青中分散,稳定剂的作用是促使改性剂与沥青发生交联反应。选用低熔点的高模量剂,且所含羟基过氧化物基团能替代常用稳定剂。制备高模量沥青的步骤为:将基质沥青加热至(180±5)℃后,按与沥青的一定质量比加入高模量剂,采用搅拌机以转速为500~700 r/min搅拌混合物3 h后完成制备。该工艺制备步骤简单,高模量剂自身与基质沥青发生交联反应实现改性,制得的改性沥青称为自反应型高模量沥青。

制备自反应型高模量沥青,分析在自反应型高模量沥青中不同质量分数的高模量剂对沥青宏观性能的影响。高模量剂在自反应型高模量沥青中的质量分数 w 分别为6%、7%、8%,制备所得材料对应标记为HMB6、HMB7、HMB8。以AC-20沥青混合料为例,沥青在沥青混合料的质量分数约为4.5%,以此进行换算,该高模量剂在沥青混合料中的实际质量分数约为0.27%~0.36%,比常见直投型高模量剂的质量分数(0.40%~0.60%)小。

2 自反应型高模量沥青中高模量剂的质量分数对沥青性能的影响

2.1 微观及理化性能

采用Leica DM2500荧光显微镜(20倍物镜倍率)观察分析3种自反应型高模量沥青样品的微观相

态,评估高模量剂在基质沥青中的分散效果,结果如图 1 所示,其中,亮色光斑为高模量剂的荧光激发图像,其微观形态反映高模量剂的分散效果。由图 1 可知:HMB6 和 HMB7 中高模量剂的分散效果良好,颗粒细密且均匀分布;HMB7 中高模量剂的分散效果优于 HMB6,高模量剂分布致密,分布范围更广,与 w 增大有关;与 HMB7 相比,HMB8 中 w 虽增大,但高模量剂分布范围有所降低,且出现明显的集聚趋势,表明 HMB8 存在相分离隐患,可能对沥青的存储稳定性产生负面影响。改性剂的集聚程度通常与改性剂的化学性质及用量有关。试验所用高模量剂可能存在最佳 w 。

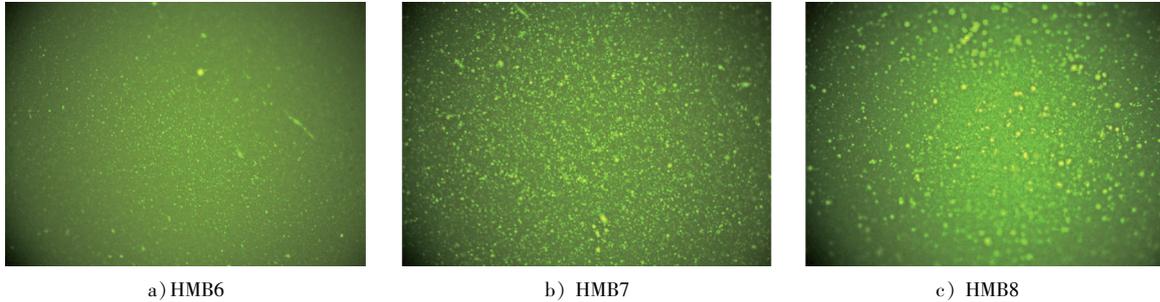


图 1 3 种自反应型高模量沥青的荧光显微图像

采用 Thermo Scientific Nicolet IS5 傅里叶变换红外光谱仪(25 °C,衰减全反射模式)分析自反应型高模量沥青与基质沥青的特征峰变化,评价高模量剂对基质沥青的作用机制,结果如图 2 所示。

由图 2 可知:3 种自反应型高模量沥青的特征峰曲线相近,仅吸收峰强度不同。与基质沥青的特征峰曲线相比,3 种自反应型高模量沥青在 699 cm^{-1} 与 965 cm^{-1} 附近均出现新的吸收峰,对应于聚苯乙烯和不饱和官能团双键的弯曲振动^[22];在 721.25 、 $2\ 850.76$ 、 $2\ 919.70\text{ cm}^{-1}$ 处,吸收峰强度及所围面积明显比基质沥青增强,分别对应于苯环上、脂肪族和芳香族 C—H 的伸缩振动^[23]。无稳定剂参与条件下,高模量剂组分仍可与沥青中的脂肪族、芳香族所含有的不饱和键发生化学反应,高模量剂对沥青的改性源自高模量剂的物理作用以及高模量剂与沥青化学反应的综合结果。

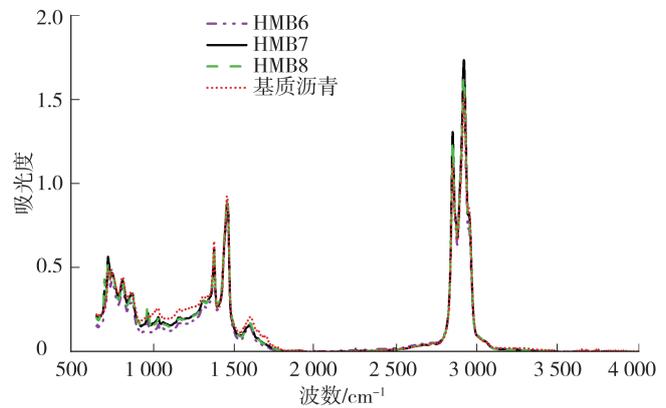


图 2 3 种自反应型高模量沥青的红外光谱

2.2 技术性能

依据文献[24],对制备的 3 种自反应型高模量沥青进行技术指标测试和薄膜烘箱试验(thin film oven test,TFOT)测试,结果如表 3 所示。

表 3 3 种自反应型高模量沥青的技术性能

沥青种类	针入度 ^① / (0.1 mm)	软化点/°C	延度 ^② / cm	延度 ^③ / cm	旋转黏度 ^④ / (Pa·s)	旋转黏度 ^⑤ / (Pa·s)	动力黏度 ^⑥ / (Pa·s)	离析软化点差/ °C	质量相对差 ^⑦ /%	针入度比 ^⑧ /%	残留延度 ^⑨ / cm	残留延度 ^⑩ / cm
HMB6	38.4	77.8	14.9	37.2	1.435	0.310	9 691	1.0	0.289	67.2	8.4	20.9
HMB7	33.4	93.3	17.4	40.2	1.618	0.375	17 985	0.6	0.244	78.4	9.6	31.2
HMB8	32.1	103.3	13.3	36.9	2.309	0.687	18 366	12.1	0.172	72.6	7.4	37.5

① 25 °C, 100 g, 5 s。② 5 °C, 5 cm/min。③ 10 °C, 5 cm/min。④ 135 °C。⑤ 175 °C。⑥ 60 °C。⑦ TFOT 老化后变化。⑧ 25 °C, 100 g, 5 s。⑨ 5 °C, 5 cm/min。

由表2、3对比可知:自反应型高模量沥青的高温性能指标和60℃动力黏度均随 w 的增大显著增大,远超基质沥青的高温性能。低温性能方面,传统的高模量剂通常会降低沥青的低温性能,出现5℃延度测试时脆断情况,因此多改用战略公路研究计划(strategic highway research program,SHRP)的测试方法进行评价^[25]。3种自反应型高模量沥青的5℃延度均超过10cm,10℃延度比基质沥青大,表明高模量剂中低密度乙烯组分能改善低温性能。较低的旋转黏度和良好的薄膜烘箱试验后指标也表明自反应型高模量沥青的施工性能和短期老化性能优势。随 w 的增大,自反应型高模量沥青的延度先增大后衰减,离析软化点差由较理想变至劣化,该变化与图2中高模量剂由均匀分散过渡至集聚状态的趋势一致。综合荧光显微镜分析及技术性能测试结果表明,高模量剂在自反应型高模量沥青中的理想质量分数为7%,约为传统干法高模量剂用量的50%~80%。

2.3 流变性能

采用复数剪切模量 G^* 和相位角 δ 描述沥青材料的流变特性,SHRP中以抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 描述沥青材料的最高使用温度,要求该温度下沥青材料的 $G^*/\sin\delta$ 同时满足原样时大于1.0kPa和短期老化样品时大于2.2kPa的要求。依据文献[26],对3种高模量沥青的原样及短期老化样品进行温度扫描试验,测试 G^* 和 δ 并计算抗车辙因子,评价其高温抗车辙性能。采用Anton Paar SmartPave动态剪切流变仪,沥青试样为圆柱形,直径 $\Phi=25$ mm,高 $h=1$ mm;加载方式为应变控制模式,剪切荷载频率为10rad/s,初始测试温度为76℃,递增步长为6℃。3种自反应型高模量沥青原样及短期老化样品的 $G^*/\sin\delta$ 结果如图3所示。

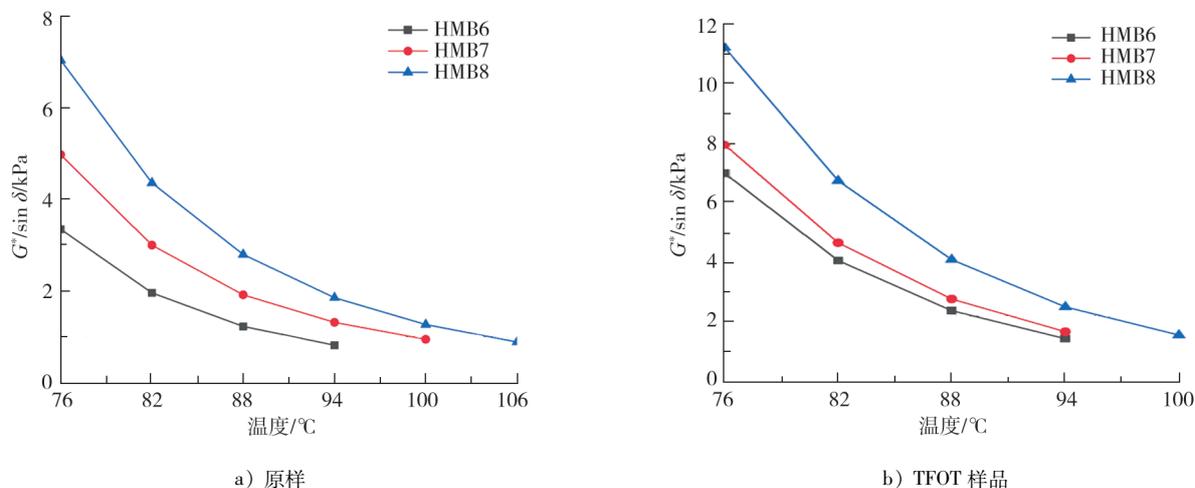


图3 自反应型高模量沥青 $G^*/\sin\delta$ 与温度的关系

由图3可知:3种自反应型高模量沥青原样及短期老化样品的 $G^*/\sin\delta$ 均随测试温度的升高而减小,但相同温度下随 w 增大而增大,反映高模量剂能提高材料的高温流变性能。当 w 、测试温度相同时,短期老化样品的 $G^*/\sin\delta$ 比原样有所增大,HMB6、HMB7、HMB8分别增大77%~109%、27%~59%、23%~59%。 $G^*/\sin\delta$ 的增幅小意味着受短期老化的影响小,故HMB7和HMB8的抗短期老化性能优于HMB6。按SHRP的评价标准,HMB6和HMB7的高温等级为PG(性能等级,performance grade)88,HMB8为PG94,HMB8比采用传统高模量剂时提高1个等级^[19]。

3 沥青混合料性能验证

3.1 混合料制备

以自反应型高模量沥青作为胶结料制备高模量沥青混合料,测试混合料的路用性能,验证高模量沥青的使用效果。基于高模量沥青的宏微观性能分析结果,选择HMB7制备沥青混合料。实际工程中,高

模量沥青混合料常用于沥青路面中面层承担抗车辙功能^[27],故采用中面层常用的 AC-20 进行高模量沥青混合料制备与路用性能验证。采用石灰岩作为粗、细集料,石灰岩质矿粉作为填料,技术指标均满足要求^[28]。沥青混合料的设计级配如表 4 所示。沥青混合料的拌和温度为 180 ℃,成型温度为 175 ℃, HMB7 在 AC-20 中的质量分数为 4.5%,采用马歇尔法设计参数如表 5 所示。

表 4 AC-20 的设计级配

筛孔边长/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	97.6	89.3	74.2	58.3	36.5	23.5	17.9	13.4	10.0	8.1	6.3

表 5 AC-20 的马歇尔设计参数

马歇尔稳定度/kN	流值/mm	空隙率/%	沥青饱和度/%	矿料间隙率/%
17.12	3.02	4.19	68.62	12.94

3.2 混合料性能验证

分别以 60 ℃ 车辙试验、-10 ℃ 低温弯曲试验、冻融劈裂试验评价自反应型高模量沥青混合料的高温抗车辙性能、低温抗开裂性能和水稳定性^[28],与文献[27]中干法高模量沥青混合料 AC-20 和普通沥青混合料 AC-20 的路用性能测试结果对比,结果如表 6 所示。由表 6 可知:自反应型高模量沥青混合料的动稳定度大于 18 000 次/mm,优于干法高模量沥青混合料,表明其高温抗车辙性能优异;其破坏应变比干法高模量沥青混合料和普通沥青混合料分别增大 18%、30%,表明其低温抗裂性能更具优势。自反应型高模量沥青混合料的冻融劈裂强度比 T_{SR} 小于干法高模量沥青混合料。自反应型高模量沥青混合料的初始劈裂强度明显高于干法高模量沥青混合料,冻融后二者的劈裂强度相近,故仅以 T_{SR} 比较二者水稳定性并不完全合理。

表 6 3 种沥青混合料的路用性能

沥青混合料类型	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	破坏应变/10 ⁻³	初始劈裂强度/MPa	冻融后劈裂强度/MPa	T_{SR} ^① /%
自反应型高模量	18 750	2.736	1.282	1.078	84.1
干法高模量 ^[27]	14 001	2.323	1.170	1.079	92.3
普通 AC-20 ^[27]	1 250	2.097	0.620	0.505	81.5

① T_{SR} 为冻融后劈裂强度与初始劈裂强度之比。

通过浸水汉堡车辙试验验证自反应型高模量沥青混合料的水稳定性^[29]。浸水汉堡车辙试验于高温、浸水环境下重复碾压沥青混合料 2 万次,以碾压周期内车辙曲线出现剥落拐点的时间及其后的斜率评价材料的抗水性能,并以试验终止时的车辙深度评价材料的高温性能,要求终止车辙深度不大于 12.5 mm。通过沥青路面分析仪进行饱水条件下的汉堡车辙试验,试验温度为 60 ℃,结果如图 4 所示。由图 4 可知:经历 2 万次碾压后,自反应型高模量沥青混合料的平均车辙深度仅为 5.1 mm,显著小于终止深度(12.5 mm)要求;试验终止时,左、右轮的车辙曲线均未出现剥落拐点,即测试过程中自反应型高模量始终处于稳定变形阶段,未因高温动水影响产生沥青与石料剥离现象,表明其水稳定性优异。

通过四点弯曲疲劳试验评价沥青混合料抗疲劳性能^[30]。以四点弯曲疲劳试验机测试自反应型高模量沥青混合料的疲劳寿命^[24]。试验温度低于 20 ℃,采用应变控制模式,应变水平分别为 4×10^{-4} 、 5×10^{-4} 、 6×10^{-4} ,施加频率为 10 Hz 的半正矢重复荷载,以劲度模量降至初始值 50%时的重复加载次数作为疲劳寿命,测试结果如图 5 所示。由图 5 可知:自反应型高模量沥青混合料的疲劳寿命为干法高模量沥青混合料的 2~3 倍、普通 AC-20 沥青混合料的 2~5 倍,疲劳性能优异。

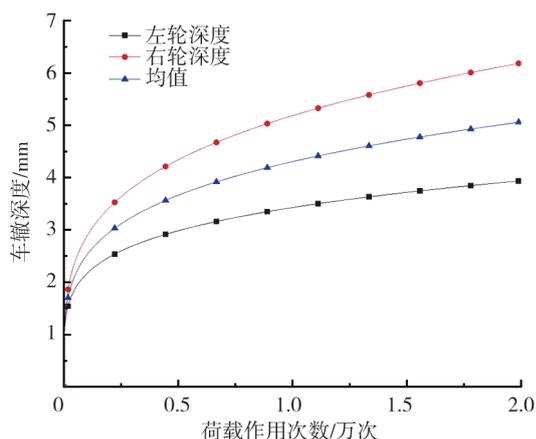


图4 自反应型高模量沥青混合料汉堡车辙试验曲线

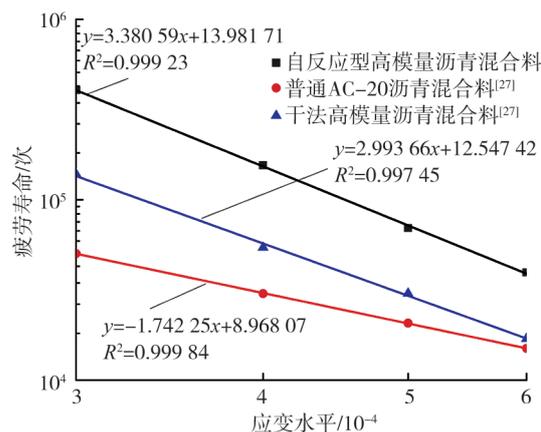


图5 自反应型高模量沥青混合料的疲劳寿命

4 结论

以低密度乙烯-苯乙烯类共聚物作为高模量剂制备自反应型高模量沥青,基于自反应型高模量沥青的微观、宏观性能测试研究高模量剂在自反应型高模量沥青中的合理质量分数;采用优选的自反应型高模量沥青制备 AC-20 型高模量沥青混合料,基于路用性能测试验证高模量剂的使用效果。

1) 低密度乙烯-苯乙烯共聚物类高模量剂在无稳定剂的参与下,以纯搅拌工艺即可完成对基质沥青的改性,理化分析表明其性能提高源自高模量剂物理特性和化学反应的综合作用。

2) 高模量剂在自反应型高模量沥青中的质量分数为 6% 和 7% 时,分散效果和路用性能优异,高模量剂在自反应型高模量沥青中的质量分数为 8% 时高模量剂呈集聚趋势,且低温性能和存储稳定性均衰减,宏观性能与微观分布状态变化一致,较理想的高模量剂在自反应型高模量沥青中的质量分数为 7%。

3) 以优选高模量剂在自反应型高模量沥青中的质量分数 7% 制备自反应型高模量沥青为胶结料时,高模量沥青混合料在高温、低温及疲劳性能方面均明显优于传统的干法高模量沥青混合料,前者的高模量剂与沥青的质量比仅为后者的 50%~80%,验证了自反应型高模量沥青的技术及经济优势。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述 2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10):1-66.
- [2] LEE H J, LEE J H PARK H M. Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(5):1079-1087.
- [3] WANG C, WANG H, ZHAO L D, et al. Experimental study on rheological characteristics and performance of high modulus asphalt binder with different modifiers[J]. Construction and Building Materials, 2017, 155:26-36.
- [4] XIAO F P, MA D H, WANG J Y, et al. Impacts of high modulus agent and anti-rutting agent on performances of airfield asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204:1-9.
- [5] 张涛, 陈实, 柯文豪. 基于法国标准 EME14 的中国标准高模量沥青混合料 HMAM-13 性能研究[J]. 公路, 2023, 68(11):57-64.
- [6] 郝培文, 王俊彪, 曾志武, 等. 不同类型高模量沥青混合料抗剪性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(12):4054-4060.
- [7] 夏全平, 高江平, 罗浩原, 等. 用于高模量沥青砼的复合改性硬质沥青低温性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(3):541-549.
- [8] 张业茂, 胡光伟, 赵锡娟, 等. 掺加抗车辙剂改性沥青混合料高温性能研究[J]. 公路, 2012, 57(9):178-184.
- [9] 钱喜红, 关永胜, 臧国帅, 等. 高模量沥青混合料技术路径与合理评价指标应用研究[J]. 公路, 2020, 65(1):231-238.
- [10] 周海防, 韩凌, 芮照诚, 等. 高模量改性沥青及其干法沥青混合料路用性能研究[J]. 甘肃科学学报, 2025, 37(2):

- 77-84.
- [11] 王昊, 韦金城, 张东晓, 等. 聚烯烃类高模量沥青混合料路用性能的试验研究[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(2):86-92.
- [12] 郁嘉栋, 李歆, 潘友强, 等. 不同高模量改性沥青及混合料性能评价[J]. 石油沥青, 2024, 38(4):18-22.
- [13] 沙爱民, 周庆华, 杨琴. 高模量沥青混凝土材料组成设计方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(3):1-5.
- [14] 任瑞波, 耿立涛, 扈少华. 高模量剂粒度对沥青混合料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2):408-412.
- [15] 张映雪, 朱文静, 邱冬华, 等. SBS/PU 复合改性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), 2023, 20(6):100-108.
- [16] WONG C C, WONG W G. Effect of crumb rubber modifiers on high temperature susceptibility of wearing course mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(8):1741-1745.
- [17] 王立志, 王鹏, 徐强, 等. 添加剂型高模量沥青混合料作用机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(6):42-48.
- [18] 熊子佳, 洪锦祥, 邓成, 等. 硬质沥青对沥青及混合料路用性能影响研究[J]. 中外公路, 2016, 36(6):238-241.
- [19] 李梦月. 基于硬质沥青与 SBS 改性沥青分别制备的高模量沥青性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.
- [20] 王朝辉, 舒诚, 韩冰, 等. 高模量沥青混凝土研究进展[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1):1-15.
- [21] 耿立涛, 刘悦, 韩洪超, 等. 生物基稳定剂对 SBS 改性沥青性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1335-1340.
- [22] ZHOU Z G, CHEN G H. Preparation, performance, and modification mechanism of high viscosity modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2021, 310:125007.
- [23] 王立志, 刘凯, 王鹏, 等. 微观特性对 SBS 改性沥青存储稳定性影响研究[J]. 山东建筑大学学报, 2020, 35(6):7-14.
- [24] 中华人民共和国交通运输部. 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.
- [25] 黄琪, 刘安, 严二虎. 高模量改性沥青低温性能多指标评价研究[J]. 公路, 2022, 67(3):42-48.
- [26] American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR): AASHTO T315-20[S]. Washington D. C., USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
- [27] 扈少华. 添加剂型高模量沥青混合料特性及应用技术研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2013.
- [28] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [29] American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for determining rutting susceptibility of hot mix asphalt (HMA) using the asphalt pavement analyzer (APA): AASHTO TP 63[S]. Washington D. C., USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2009.
- [30] SOUSA DE OLIVEIRA L, FEITOSA DE ALBUQUERQUE LIMA BABADOPULOS L, SOARES J B. Evolution of asphalt binder stiffness during fatigue loading and rest periods and its impact on fatigue life[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 144(3):106041.

Performance evaluation of self-reactive high modulus asphalt

LI Bingnan¹, GENG Litao^{2*}, PENG Jialin¹, WANG Fengjiao¹, XU Wanlei¹

1. Shandong Kingyue Transportation Development Group Co., Ltd., Jinan 250101, China;

2. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

Abstract: To address the issues of low additive utilization poor low temperature and fatigue performance in high modulus asphalt mixture, for direct application, a self-reactive high modulus asphalt and asphalt mixture are prepared

(下转第 95 页)

mechanism. The temperature changes of iron ore tailing particles and concrete, as well as the ultrasonic pulse velocity (UPV) variations of iron ore tailing concrete before and after microwave irradiation, are analyzed. Scanning electron microscopy (SEM) is employed to observe the surface morphology and microstructure of the concrete before and after irradiation to investigate internal micro-damage. The results indicate that the iron-containing oxides in iron ore tailings possess superior wave-absorbing capabilities. The temperatures of both iron ore tailings and limestone increase with irradiation time, while the heating rate decreases; however, the temperature rise of iron ore tailings is larger than that of limestone. At the same irradiation time, the temperature of iron ore tailing concrete increases with increasing power. The wave-absorbing efficiency is highest at 6 kW. The temperature difference of the specimens before and after irradiation increases linearly at first and then slows down with increasing irradiation time. The UPV of the concrete decreases with increasing irradiation time and power. At the same power, the UPV attenuation rate increases rapidly initially and then slows down with increasing time. Under 0.2, 4, 6, 8 kW power and 0~5 min irradiation, the UPV attenuation rate can reach up to 35.29%. After microwave irradiation, 1~3 μm thermal stress cracks are generated in the interfacial transition zone between iron ore tailings and mortar and propagate along the interface.

Keywords: microwave irradiation; iron tailing; ultrasonic wave sound speed; cement concrete

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第 79 页)

using low-density ethylene-styrene copolymer-based high-modulus agents, and their technical performance is evaluated. Three kinds of self-reactive high modulus asphalt are prepared with rather lower content (6%, 7% and 8%) of low-density ethylene-styrene copolymer as high modulus agent by pure mixing process, then the dispersion state and modification mechanism of high modulus agent are analyzed based on microscopic and physicochemical properties. The reasonable content of high modulus agent is selected based on the results of macroscopic performance test. Furthermore, the high modulus asphalt mixture with the preferred modifier content is prepared and its pavement performance is evaluated by laboratory tests. Results show that the modification process of self-reactive high modulus asphalt is a combination of the physical action of the high modulus agent and the chemical reaction between the asphalt binder and the modifier. The preferred high modulus agent content is 7% (by mass of the asphalt), which is 50%–80% of the modifier content in the dry-process. In this condition, the microscopic dispersion effect of the high modulus agent and the low-temperature performance of high modulus asphalt are desirable, and the PG high-temperature grade of high modulus asphalt is improved by one grade compared with that of the conventional high modulus asphalt. In addition to its superior high temperature performance, the high modulus asphalt mixture with optimum modifier content exhibited an 18% improvement in low-temperature destructive strain relative to conventional high modulus asphalt mixture with dry-process, while also achieving a 2 to 3 times extension in fatigue life.

Keywords: low-density ethylene-styrene copolymer; high modulus agent; self-reactive high modulus asphalt; microscopic property; rheological characteristics; pavement performance

(责任编辑:王惠)