

耐久性复合改性沥青混合料的路用性能

屈会朋

华设(江苏)新材料科技有限公司,江苏 南京 211100

摘要:为提高公路沥青路面的耐久性,将A(聚乙烯复合材料)、B(高分子复合材料)、C(橡塑合金材料)和D(聚合物复合材料)4种复合改性剂分别掺入AC-13沥青混合料制备符合改性沥青混合料,对比抗车辙性能,优选性能均衡的复合改性剂C。将复合改性剂C掺入高性能级配沥青混合料SUP-20制备复合改性沥青混合料,以苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(styrene-butadiene triblock copolymer, SBS)改性沥青混合料SUP-20为对照试样,分别进行高温抗车辙性能试验、抗水损害性能试验、低温性能试验等。试验结果表明:复合改性后的C-70#基质沥青SUP-20混合料的平均动稳定度增大11.0%,劈裂强度比增大1.7%,抗弯拉强度增大8.6%,抗低温破坏性能增大14.9%,在温度5、20、35℃和频率0.1、1、10 Hz下的动态模量都高于SBS改性沥青SUP-20混合料,相位角都小于SBS改性沥青SUP-20混合料。

关键词:复合改性;路用性能;耐久性;高温稳定性;低温性能;抗水损害性能

中图分类号:U414;U214.7

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)02-0019-07

引用格式:屈会朋. 耐久性复合改性沥青混合料的路用性能[J]. 山东交通学院学报, 2024, 32(2): 19-25.

QU Huipeng. Pavement performance of durable composite modified asphalt mixture[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(2): 19-25.

0 引言

严重的沥青路面病害会影响路面行车的舒适性^[1],某种病害的产生可能加速诱导其他病害的产生和发展,例如行车荷载可能诱导车辙病害处产生微细裂缝,并在行车荷载反复作用下扩展,在水的作用下面层坑槽、裂缝等其他病害问题加剧^[2-3]。提高沥青混合料的抗压强度,减少车辙及路面水损坏是沥青路面特别是山岭重丘区沥青路面亟需解决的问题。现有研究多集中在掺加纤维和改性剂、沥青改性、沥青混合料级配调整、沥青混合料设计、优化结构层组合等方面^[4-8]。

在沥青混合料中掺加复合改性剂是提升抗高温变形能力及耐久性的有效途径^[9]。在沥青中掺加氯丁二烯橡胶(chloroprene rubber, CR)、苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(styrene-butadiene triblock copolymer, SBS)、多聚磷酸(polyphosphoric acid, PPA)或石墨烯等改性剂进行复合改性,可改善沥青的路用性能^[10]。李郑^[11]、邹虎等^[12]将PPA和CR复合改性沥青用于紫外线辐射强、昼夜温差大的西藏地区,研究得到的最优复配方案为CR、PPA与沥青混合料的质量比分别为0.200 0、0.012 5。现有研究多集中在沥青混合料的制备工艺、配方优化和性能表征等方面,但因改性剂和沥青本身的复杂性、表征方法欠缺等原因,改性机理及工业应用研究不足^[13]。

本文从A(聚乙烯复合材料)、B(高分子复合材料)、C(橡塑合金材料)和D(聚合物复合材料)4种复合改性剂中优选1种改性剂,对沥青混合料进行改性,通过高温抗车辙性能试验、抗水损害性能试验、低温性能试验等,对比研究复合改性剂对沥青混合料路用性能的影响,以期高耐久、长寿命沥青路面的发展提供指导。

收稿日期:2023-05-17

基金项目:贵州省公路局2021年科技项目(2021QLM14)

作者简介:屈会朋(1990—),男,江苏徐州人,工程师,主要研究方向为道路工程材料技术,E-mail:541782229@qq.com。

1 复合改性剂优选

1.1 沥青混合料级配及马歇尔试验

为研究复合改性剂对改善沥青混合料路用性能的效果,将 A(聚乙烯复合材料)、B(高分子复合材料)、C(橡塑合金材料)和 D(聚合物复合材料)4种复合改性剂分别掺入 AC-13 沥青混合料,复合改性剂与沥青混合料的质量比均为 0.003,油石比为 5.0%。AC-13 沥青混合料的级配如表 1 所示。复合改性剂沥青混合料毛体积密度为 2.416 g/cm^3 ,理论最大相对密度为 2.515,马歇尔试验结果如表 2 所示。由表 2 可知:掺入复合改性剂后,沥青混合料的各指标均满足规范[14]要求。

表 1 AC-13 沥青混合料的级配

方筛边长/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
合成级配的通过率/%	100.0	98.0	69.6	40.9	32.2	24.5	16.6	10.5	7.4	5.8
控制上限的通过率/%	100.0	100.0	73.6	44.9	35.2	27.5	19.6	13.5	10.4	7.8
控制下限的通过率/%	100.0	94.0	65.6	36.9	29.2	21.5	13.6	7.5	4.4	3.8

表 2 马歇尔试验结果

项目	空隙率/%	矿料间隙率/%	饱和度/%	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)
试验结果	3.9	13.9	71.7	9.27	32.6
技术要求 ^[14]	3.0~5.0	≥13.9	65.0~75.0	≥8.00	20.0~40.0

1.2 改性后沥青混合料性能试验

将复合改性沥青混合料与对照试样(未掺复合改性剂的 AC-13 沥青混合料)的抗车辙性能(动稳定度)对比,综合考虑低温小梁试验、抗水损害试验结果,确定改性后沥青混合料综合性能最佳的复合改性剂。

1.2.1 路用性能

掺入不同复合改性剂后沥青混合料的路用性能如表 3 所示。不掺入复合改性剂的对照试样的破坏应变为 1.997×10^{-3} ,动稳定度为 1 338 次/mm。

由表 3 可知:采用不同复合改性剂改性沥青混合料后,沥青混合料的抗车辙性能提高,分别加入 A、B、C、D 等 4 种复合改性剂的沥青混合料的动稳定度比对照试样

表 3 掺入不同复合改性剂后沥青混合料的路用性能

改性剂	破坏应变/ 10^{-6}	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	劈裂强度比/%
A	2 135.8	1 873	87.7
B	1 982.9	3 772	95.9
C	2 646.3	3 198	95.8
D	2 203.6	3 119	91.5
技术要求 ^[14]	≥2 500.0	≥2 400	≥80.0

分别提高 40%、182%、139%、133%,破坏应变及劈裂强度比也有所提升,改性效果明显。原因主要是在沥青混合料拌和过程中复合改性剂熔融,经摊铺和碾压后形成网络结构,将集料颗粒稳固在网络结构中。铺筑完成后的沥青路面即使表面温度高于沥青的软化点,网络结构依然有约束作用,不易产生车辙^[15-18]。

复合改性剂的作用机理如图 1 所示。沥青混合料和复合改性剂间的化学交换作用如图 2 所示。加入复合改性剂后,沥青混合料系统内部结构重新分布,改性剂通过溶胀减小表面能,沥青混合料趋于新平衡。复合改性剂颗粒的某些聚合物链段扩散到沥青相中形成界面层,减缓分子的运动;部分高分子聚合物可与沥青分子链形成高稳定性、高强度的网络结构,有助于提高沥青混合料的力学性能。因此,复合改性剂沥青混合料的低温性能及抗水损害性能在一定程度上得以改善,综合沥青混合料的高温性能、低温性

能及抗水损害性能,确定复合改性剂 C 为最佳改性剂。

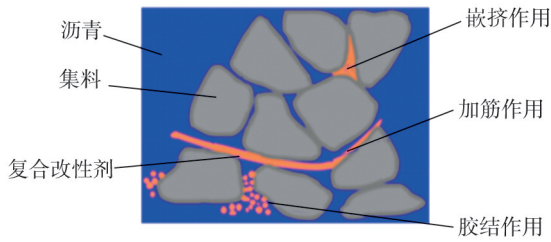


图 1 复合改性剂作用机理

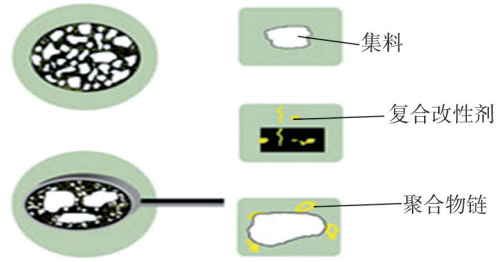


图 2 沥青混合料和复合改性剂间的化学交换作用

1.2.2 耐久性

为明确复合改性剂对提高沥青混合料耐久性的效果,参照文献[19]进行四点弯曲疲劳寿命试验,测试恒定应变为 230×10^{-6} ,疲劳寿命为 10^6 次,试验温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 下复合改性剂 C-AC-13 沥青混合料(以下简称 C-AC-13 沥青混合料)的疲劳性能,试验结果如表 4 所示。由表 4 可知:C-AC-13 沥青混合料的劲度模量损失率均小于 31%,最小劲度模量损失率为 17.7%,表明复合改性剂 C 可明显提高沥青混合料的抗疲劳性能。

表 4 C-AC-13 沥青混合料的疲劳性能试验结果

试件	劲度模量/GPa		劲度模量 损失率/%	试件	劲度模量/GPa		劲度模量 损失率/%
	初始	终止			初始	终止	
1	13.319	10.447	21.6	4	13.518	10.125	25.1
2	13.743	9.547	30.5	5	13.367	9.946	25.6
3	13.130	10.810	17.7	6	13.466	10.367	23.0

为直观反映复合改性剂 C 对提高 AC-13 沥青混合料疲劳性能的效果,调研常见沥青混合料的疲劳试验结果,试验温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$,劲度模量损失为 50%时的疲劳试验结果如表 5 所示。由表 5 可知:其他类型沥青混合料在劲度模量损失为 50%时,疲劳寿命小于 3×10^5 次,说明复合改性剂 C 可提高沥青混合料的疲劳性能。

表 5 常见沥青混合料的疲劳试验结果

沥青混合料类型	应变/ 10^{-6}	疲劳寿命/次	沥青混合料类型	应变/ 10^{-6}	疲劳寿命/次
改性沥青 AC-20C	130	625 302	AR-AC-13	400	249 188
矿物纤维 SMA-13	400	96 250	SUP-13	400	133 259
SBS 改性沥青 SMA-13	400	85 778	AC-13	400	125 654
改性沥青 AC-20	400	333 420	木质素 SMA-13	400	213 441
70#道路石油沥青 AC-20	400	103 170	木质素 SMA-16	400	120 872

注:AR-AC-13 为橡胶沥青混凝土,SUP-13 为高性能沥青。

2 原材料

70#基质沥青、SBS 改性沥青的技术指标如表 6 所示。由表 6 可知,二者均满足文献[19]的技术要求。试验选用国道 G210 独山至新寨改造工程自加工料场的粗集料,技术指标如表 7 所示。细集料技术指标如表 8 所示。采用优质石灰岩经单独磨细制成矿粉,技术指标如表 9 所示。由表 7~9 可知,各组分

均满足技术要求。

表 6 试验所用沥青的技术指标

沥青类型	25℃针入度/(0.1mm)	5℃延度/cm	软化点/℃	旋转薄膜烘箱加热试验后残留物			60℃动力黏度/(Pa·s)	135℃布氏黏度/(Pa·s)
				质量变化/%	针入度比/%	5℃延度/cm		
70#基质沥青	72.4	7.9	51.5	0.59	69.3	5.3	477	0.15
SBS改性沥青	55.4	26.8	79.3	0.44	76.8	16.9	23 169	2.03

表 7 粗集料技术指标

项目	压碎值/%	高温压碎值/%	表观相对密度	吸水率/%	对沥青的黏附等级	针片状颗粒质量分数 ^① /%	粒径小于0.075mm颗粒质量分数 ^② /%
试验结果	13.5	17.6	2.674	0.64	5级	11.4	0.6
技术要求 ^[14]	≤24.0		≥2.600	≤2.00	≥4级	≤15.0	≤1.0

①采用游标卡尺法测试针片状颗粒的质量分数。

②采用水洗法测试。

表 8 细集料技术指标

项目	表观相对密度	砂当量/%	亚甲蓝值/(g·kg ⁻¹)	粒径小于0.075mm颗粒质量分数 ^① /%	棱角性(流动时间)/s
试验结果	2.588	68.4	8.0	11.3	47.4
技术要求 ^[14]	≥2.500	≥60.0	≤25.0	≤15.0	≥30.0

①采用水洗法测试粒径小于0.075mm颗粒的质量分数。

表 9 矿粉的技术指标

项目	表观相对密度	不同粒径颗粒的质量分数/%			亲水系数	含水量/%	塑性指数
		<0.6mm	<0.15mm	<0.075mm			
试验结果	2.733	100.0	91.4	83.6	0.5	0.3	1.8
技术要求 ^[14]	≥2.500	100.0	90.0~100.0	80.0~100.0	<0.8	≤1.0	<3.0

3 配合比设计与沥青混合料性能试验

设计 SUP-20 级配进行沥青混合料路用性能研究,复合改性剂 C 与沥青混合料的质量比为 0.003。SUP-20 沥青混合料的旋转压实试件的空隙率为 4.0%±0.5%,油石比为 4.3%。对复合改性的 SUP-20 沥青混合料 C-70#基质沥青 SUP-20 混合料进行高温性能、抗水损害性能和低温性能试验,并与 SBS 改性沥青 SUP-20 混合料进行对比。

3.1 高温抗车辙性能

参照文献[19]车辙试验方法进行沥青混合料的高温稳定性试验,结果如表 10 所示。

表 10 2种沥青混合料试件的动稳定度

试件	动稳定度/(次·mm ⁻¹)				技术要求 ^[19]	变异系数/%	变异系数技术要求 ^[19] /%
	试件 1	试件 2	试件 3	平均			
SBS 改性沥青 SUP-20 混合料	4 437	4 737	4 294	4 489	≥3 000	5.0	≤20
C-70#基质沥青 SUP-20 混合料	5 018	4 826	5 105	4 983		2.3	

由表 10 可知:2 种沥青混合料的动稳度和变异系数均满足技术要求;与对照试样相比,C-70[#]基质沥青 SUP-20 混合料的平均动稳度比 SBS 改性沥青 SUP-20 混合料增大 11.0%,C-70[#]基质沥青 SUP-20 混合料的变异系数比 SBS 改性沥青 SUP-20 混合料减小 54.0%,表明复合改性剂 C 能较大程度改善 SUP-20 沥青混合料的高温抗变形性能。

复合改性剂 C 含一定细橡胶粉,胶粉在降解过程中释放大量相对分子量为 $3 \times 10^2 \sim 5 \times 10^5$ 级的聚合物,在沥青中类似连续级配分布,与沥青形成良好的密实分子级配聚合物,与高密度连续配筋结构作用相当,低温黏度高,有助于提高沥青混合料的动稳度^[20-22]。

3.2 抗水损害性能

采用冻融劈裂试验评价 2 种沥青混合料的抗水损害性能,结果如表 11 所示。

表 11 不同沥青混合料试件的冻融劈裂试验结果

试件	空隙率/%		劈裂强度/MPa		劈裂强度比/%
	干燥状态	冻融循环	干燥状态	冻融循环	
SBS 改性沥青 SUP-20 混合料	6.9	6.9	0.625 7	0.544 6	87.0
C-70 [#] 基质沥青 SUP-20 混合料	6.4	6.3	0.726 4	0.642 9	88.5

由表 11 可知:C-70[#]基质沥青 SUP-20 混合料的劈裂强度比文献[9]中的要求(80%)增大 10.6%,与对照试样相比,劈裂强度比增大 1.7%。

与动稳度增大的原理一致,复合改性剂 C 增大沥青混合料的低温黏度,改善了沥青与集料间的黏附性及黏结强度。

3.3 低温性能

参照文献[19]中四点弯曲试验方法进行不同沥青混合料的试件低温性能试验,试验测试结果如表 12 所示。

表 12 不同沥青混合料试件的低温性能试验结果

试件	最大荷载/N	跨中挠度/mm	抗弯拉强度/MPa	E/MPa	破坏应变/ 10^{-6}
SBS 改性沥青 SUP-20 混合料	1 014	0.440	8.26	3 576.0	2 311.3
C-70 [#] 基质沥青 SUP-20 混合料	1 102	0.506	8.97	3 393.0	2 656.0

由表 12 可知:C-70[#]基质沥青 SUP-20 混合料的抗弯拉强度比 SBS 改性沥青 SUP-20 混合料增大 8.6%,低温抗破坏应变增大 14.9%。说明 C-70[#]基质沥青 SUP-20 混合料低温黏度高,黏韧性提升,与集料黏附性更好。

3.4 动态模量分析

为进一步对比抗永久变形能力,测试 2 种沥青混合料在不同温度、频率 f 下的动态模量和相位角,结果如表 13、14 所示。

表 13 不同沥青混合料试件的动态模量试验结果

温度/°C	动态模量/GPa					
	SBS 改性沥青 SUP-20 混合料			C-70 [#] 基质沥青 SUP-20		
	$f=10$ Hz	$f=1$ Hz	$f=0.1$ Hz	$f=10$ Hz	$f=1$ Hz	$f=0.1$ Hz
5	18.253	13.512	8.789	20.553	16.751	10.992
20	9.631	5.661	2.966	11.315	5.672	3.091
35	3.744	1.755	0.792	4.853	1.905	0.885

表 14 不同沥青混合料试件的相位角试验结果

温度/℃	相位角/(°)					
	SBS 改性沥青 SUP-20 混合料			C-70 [#] 基质沥青 SUP-20 混合料		
	$f=10\text{ Hz}$	$f=1\text{ Hz}$	$f=0.1\text{ Hz}$	$f=10\text{ Hz}$	$f=1\text{ Hz}$	$f=0.1\text{ Hz}$
5	12.06	14.67	20.68	6.70	9.80	16.40
20	20.83	26.20	30.05	19.10	24.95	28.96
35	28.33	31.68	32.86	26.62	26.87	29.44

由表 13、14 可知:不同温度、频率下,C-70[#]基质沥青 SUP-20 混合料的动态模量均大于 SBS 改性沥青 SUP-20 混合料,相位角均小于 SBS 改性沥青 SUP-20 混合料。

沥青混合料是黏弹性物质,若动态模量越大、相位角越小,则更接近弹性体,温度较高情况下其抵抗车辙病害的能力越强。和对照试样相比,C-70[#]基质沥青 SUP-20 混合料的动态模量大,表明其促进沥青混合料由黏性向弹性转变,可增强沥青混合料抗永久变形能力^[23-24]。

4 结论

1)为提高沥青混合料的抗车辙性能,将 A(聚乙烯复合材料)、B(高分子复合材料)、C(橡塑合金材料)和 D(聚合物复合材料)4 种复合改性剂分别掺入 AC-13 沥青混合料,从破坏应变、动稳定度及劈裂强度比等方面对比不同材料的性能,优选复合改性剂 C。

2)SBS 改性沥青 SUP-20 混合料未掺入复合改性剂 C,作为对照试件,掺入复合改性剂 C 的 C-70[#]基质沥青 SUP-20 混合料试件的抗车辙性能、抗低温开裂性能、抗水损害性能均得以改善,动稳定度、劈裂强度比、低温抗破坏应变比 SBS 改性沥青 SUP-20 混合料试件分别提高 11.0%、1.7%、14.9%。掺加复合改性剂 C 使得沥青结构类似于连续级配分布,改性剂释放的聚合物与沥青混合料形成良好的密实分子级配聚合物,与高密度连续配筋结构作用相当,低温黏度高,有助于提高沥青混合料的动稳定度,改善沥青与集料间的黏附性及黏结强度。

3)C-70[#]基质沥青 SUP-20 混合料的动态模量较大,表明复合改性剂 C 促使沥青混合料由黏性向弹性转变,抗永久变形性能优异。

参考文献:

- [1] 蔡扬发,黄民如,杨海明,等. 湿热地区高速公路坑槽病害评估与对策[J]. 中国水运,2023(4):158-160.
- [2] 王运强. 公路沥青路面病害成因分析及预防处置[J]. 中国公路,2020(11):174-175.
- [3] 翁盛林. 沥青混凝土路面病害成因分析及防治措施[J]. 建材与装饰,2019(17):284-285.
- [4] 王娜. 高模量沥青混合料的设计与施工控制[J]. 北方交通,2015(2):89-91.
- [5] 董雪山. 探析高速公路路面病害成因及养护技术措施[J]. 人民交通,2020(5):76.
- [6] 李靖. 高速公路路面病害成因及养护施工技术[J]. 交通世界,2022(26):61-63.
- [7] 彭涛,韩帅,周昌勇. 山区高速公路隧道典型病害分析与防治[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(9):212-213.
- [8] 马一飞. 三维探地雷达的典型病害识别检测与应用[J]. 中国公路,2022(21):90-91.
- [9] 吴荣桂,孙希来. 西南地区高速公路桥梁典型病害及成因分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2020,16(10):205-208.
- [10] 周大兵. 公路复合改性剂沥青路面施工技术分析[J]. 运输经理世界,2021(3):145-146.
- [11] 李郑. 多聚磷酸与橡胶粉复合改性沥青及其混合料在西藏地区的应用研究[J]. 公路工程,2016,41(1):230-235.
- [12] 邹虎,李强. 石墨烯复合橡胶改性沥青及其混合料路用性能研究[J]. 公路交通科技,2020,37(10):46-56.

- [13] 李明扬. 高模量沥青结合料及其混合料技术性能试验研究[D]. 天津:河北工业大学,2023.
- [14] 中华人民共和国交通运输部,交通运输部公路科学研究院. 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.
- [15] 朱逸凡. 高温重载下沥青混合料高温稳定性能研究及应用[D]. 南京:东南大学,2019.
- [16] 周健民,吴博. 长大纵坡路段沥青路面车辙规律和影响因素[J]. 公路交通科技,2021,38(7):9-16.
- [17] 赵鹏. 山区高等级公路沥青路面预防性养护研究[J]. 交通世界,2020(30):99-100.
- [18] 杨朋. 高模量沥青及其混合料特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [19] 中华人民共和国交通运输部,交通运输部公路科学研究院. 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,2011.
- [20] 吴星,康爱红,吴帮伟,等. 基于粉胶比的SBS沥青胶浆性能的研究[J]. 公路工程,2021,46(6):121-126.
- [21] 沈源滨,李子豪,周帅. 复掺环氧树脂改性SBS沥青高温性能研究[J]. 黑龙江交通科技,2021,44(12):1-3.
- [22] 蔡斌,王佳,相宏伟,等. 超高掺量胶粉改性沥青性能评价及机理研究[J]. 公路交通科技,2022,39(9):16-22.
- [23] 刘爱华,卢勇,李亚丽,等. 石墨烯对橡胶改性沥青路用性能影响试验研究[J]. 路基工程,2021(1):68-73.
- [24] 卢桂林,许新权,唐志赞,等. 高模量改性剂的作用机理及应用研究[J]. 建筑材料学报,2021,24(2):355-361.

Pavement performance of durable composite modified asphalt mixture

QU Huipeng

China Design Group (Jiangsu) New Materials Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China

Abstract: To improve the durability of asphalt pavement, composite modifier C with balanced performance is selected from four types of composite modifiers A (polyethylene composite material), B (polymer composite material), C (rubber-plastic alloy material), and D (polymer composite material) to prepare modified asphalt mixtures compliant by mixing it with high-performance graded asphalt mixture SUP-20. Styrene-butadiene triblock copolymer (SBS) modified asphalt mixture SUP-20 is used as the control sample for conducting high-temperature anti-rutting performance tests, anti-water damage performance tests, low-temperature performance tests, etc. The test results show that the average dynamic stability, the splitting strength ratio, the flexural tensile strength, and the resistance to low-temperature damage of the C-70[#] matrix asphalt SUP-20 mixture after composite modification increases by 11.0%, 1.7%, 8.6%, and 14.9%, respectively. The dynamic modulus at temperatures of 5, 20, 35 °C and frequencies of 0.1, 1, 10 Hz are all greater than that of the SBS-modified asphalt mixture SUP-20, with phase angles less than that of the SBS-modified asphalt mixture SUP-20.

Keywords: composite modification; pavement performance; durability; high temperature stability; low temperature performance; water resistance performance

(责任编辑:王惠)