

纳米 SiO₂/POE 复合改性沥青及其混合料性能研究

孔德胜¹, 高继平²

(1.河南中州路桥建设有限公司, 河南 郑州 450006; 2.河南交院工程技术有限公司, 河南 郑州 450006)

摘要: 通过试验对 SiO₂/POE 复合改性沥青及其混合料进行性能测试, 并与 SBS 改性沥青进行对比, 分析纳米 SiO₂/POE 复合改性对基质沥青混合料路用性能的影响。结果显示, 纳米 SiO₂/POE 显著提高了基质沥青的软化点、粘度和延度, 降低了针入度; 3 种沥青中, SiO₂/POE 复合改性沥青的储能模量 G' 、抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 均最大, SiO₂/POE 改善了基质沥青的高温性能, 但其低温性能稍劣于 SBS 改性沥青; 3 种沥青混合料中, SiO₂/POE 复合改性沥青混合料的动稳定度、动态模量 E^* 均最佳, 具有优良的抗车辙能力, 在低温抗裂、耐疲劳及水稳定方面也显示了优良的性能, 但其低温抗裂性能劣于 SBS 改性沥青混合料。

关键词: 公路; 沥青混合料; 零维度纳米 SiO₂; 高分子聚合物 POE; 路用性能

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)04-0067-06

随着社会经济的繁荣发展, 交通量和轴载不断突破, 超载及渠化交通日益严重, 沥青路面病害问题难以得到有效解决。通过聚合物沥青改性技术改善沥青路面路用性能已成为道路工程领域的研究热点。纳米材料具有独有的特性, 其比表面积大, 组成的纳米粒子尺寸小, 构成的不饱和连接键促使粒子具有较大活性, 与其他材料相结合时能表现出与众不同的特殊性质, 如表面与界面效应、量子尺寸效应、小尺寸效应与宏观量子隧道效应等。目前已着手研究将纳米材料应用于沥青改性方面, 期待利用纳米粒子结构的独有特性改善沥青的路用性能, 满足重载交通发展的需要。

目前在层状纳米硅酸盐方面取得了部分成果, 如孙璐等分析了纳米改性沥青的微观结构、基本性能, 肯定了纳米粒子对沥青的改善效果, 提出了许多建设性意见; 刘大梁等研究了纳米 CaCO₃ 材料对 7 种沥青性能的影响, 分析了不同改性沥青的流变性能; 姜海涛等对蒙脱土纳米层状硅酸盐复合改性沥青进行分析, 指出沥青的抗老化性、沥青混合料的高温、低温抗裂性及水稳性均得到显著改善。根据以往研究成果, 该文通过常规试验和 SHRP 流变试验验证纳米 SiO₂/POE 复合改性沥青的性能, 通过高温车辙试验、动态模量试验、重复加载和静态蠕变试验、低温弯曲和抗疲劳试验等分析其路用性能, 为纳米 SiO₂/POE 沥青混合料在道路工程中的推广应

用提供技术支持。

1 原材料

(1) 沥青。采用山东路通化工有限公司生产的盘锦 70# 基质沥青、壳牌 SBS 改性沥青(用于纳米 SiO₂/POE 改性沥青性能对比)。

(2) 零维纳米粒子 SiO₂, 纯度为 99.5%, 由南京埃普瑞纳米材料有限公司生产。

(3) 乙烯-1-辛烯共聚物(POE), 其技术指标见表 1; 硅烷偶联剂 KH-550, 由宁波市鄞州搏特聚合物新材料有限公司生产。

表 1 高分子聚物 POE 的技术参数

参数名称	参数值
比重/(g·cm ⁻³)	0.902
熔流率/[g·(10 min) ⁻¹]	3
门尼粘度/MU	3
邵氏硬度	90
拉伸模量/MPa	7.7
抗张强度(断裂)/MPa	22.2
伸长率/%	760
弯曲模量/MPa	76.6
撕裂强度/(kN·m ⁻¹)	90.1
玻璃化转变温度/℃	-33
维卡软化温度/℃	86
熔融温度/℃	96
结晶峰温/℃	81

2 纳米 SiO₂/POE 改性沥青基本性能分析

2.1 SiO₂/POE 改性沥青的制备

根据前期研究成果提出的纳米 SiO₂/POE 复合改性沥青制备工艺参数,考虑到零维度纳米材料 SiO₂ 比表面积大、表面活化能较高,在加入沥青过程中容易发生团聚,不利于纳米粒子分散,添加 KH-550 表面活性剂。制作步骤如下:

(1) 按照常规方法加热 70[#] 基质沥青至 150℃,使其处于熔融状态,将高速剪切乳化机转速调至 5 000 r/min 以上。

(2) 在剪切搅拌沥青的同时逐步加入 5%POE

(与沥青的质量比),待 POE 融化后,加入 4%SiO₂ 与 2%表面活性剂 KH-550。保持温度 165~175℃、剪切速率 7 500~8 500 r/min,剪切 45~60 min 后取样。

2.2 纳米 SiO₂/POE 改性沥青性能分析

以常规指标和 SHRP 指标作为纳米改性沥青性能指标,试验按 JTG E50-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行,以 AH-70 基质沥青和 SBS 改性沥青作为对比。3 种沥青常规指标检测结果见表 2;SHRP 指标中高温 DSR(高温扫描,52~76℃,间隔 6℃;应变 12%;频率 10 rad/s)测试结果见表 3,低温弯曲梁蠕变 BBR 测试结果见表 4。

表 2 3 种沥青常规指标测试结果

沥青类型	25℃针入度/(0.1 mm)	软化点/℃	10℃延度/cm	60℃粘度/(Pa·s)
AH-70	64.5	50.1	18.62	287
SiO ₂ /POE 改性沥青	39.7	79.6	19.80	692
SBS 改性沥青	43.3	68.0	21.60	—

表 3 3 种沥青 DSR 测试结果

温度/℃	AH-70 DSR 测试结果			SiO ₂ /POE 改性沥青 DSR 测试结果			SBS 改性沥青 DSR 测试结果		
	G'	$\tan\delta$	$G^*/\sin\delta$	G'	$\tan\delta$	$G^*/\sin\delta$	G'	$\tan\delta$	$G^*/\sin\delta$
52	514.500	12.27	5.967	14 321	1.564	30.210	10 090	1.595	23.470
58	152.500	17.77	2.684	8 780	1.452	17.870	6 448	1.428	14.570
64	44.900	31.80	1.480	5 834	1.324	12.760	4 153	1.324	9.614
70	8.554	72.64	0.735	3 980	1.334	8.620	2 715	1.318	6.610
76	3.184	103.50	0.416	2 130	1.326	4.034	1 725	1.237	4.587

表 4 3 种沥青低温蠕变测试结果

温度/℃	AH-70 低温蠕变测试结果		SiO ₂ /POE 改性沥青低温蠕变测试结果		SBS 改性沥青低温蠕变测试结果	
	蠕变劲度 S/MPa	m 值	蠕变劲度 S/MPa	m 值	蠕变劲度 S/MPa	m 值
-12	137.5	0.346	216.9	0.426	208.0	0.432
-24	268.3	0.301	297.9	0.369	291.8	0.375

由表 2 可知:纳米 SiO₂、POE 的掺入使基质沥青的各项性能均得到不同程度改变,软化点、粘度和延度提高,针入度降低,软化点提高 59%,延度提高 6%,针入度降低 38%。说明 SiO₂/POE 复合改性沥青的高温稳定性得到提高,但沥青硬度增加,针入度值降低,高温感温性下降。SiO₂/POE 复合改性沥青的高温软化点高于 SBS 改性沥青,延度、针入度则低于 SBS 沥青。

由表 3 可知:1) SiO₂/POE 复合改性沥青的储能模量 G' 、抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 均高于基质沥青和 SBS 改性沥青(见图 1),SiO₂/POE 复合改性沥青具

有良好的高温性能,其高温抗永久变形能力得到显著改善。这是由于纳米 SiO₂ 粒子独有的结构特性与基质沥青能相互作用,在沥青结构中形成插层型,且较高表面活化能在高温条件下降低了沥青分子链的运动,使沥青的高温性能提高(软化点增加)。而 POE 材料属热塑性弹性体,具有较短支链分布结构和窄的相对分子质量,可与纳米改性沥青内部结构形成联结点,且 POE 没有不饱和双键,具有优良的抗老化性能,高温剪切过程中不仅阻碍了沥青胶质组分转移,而且其受到拉应力时联结点形成的网络状结构能承受较大变形,具有优良的拉伸伸长能力。2) 温度对

流变参数具有显著影响, G' 、 $G^* / \sin \delta$ 均随温度增加而降低,说明温度升高改变了沥青粘弹性成分比例,使其由塑性变形向粘质流变转变,沥青粘性成分增加。SiO₂/POE 复合改性沥青的温度敏感性远低于 SBS 改性沥青,在高温条件下,其粘质成分转变效率

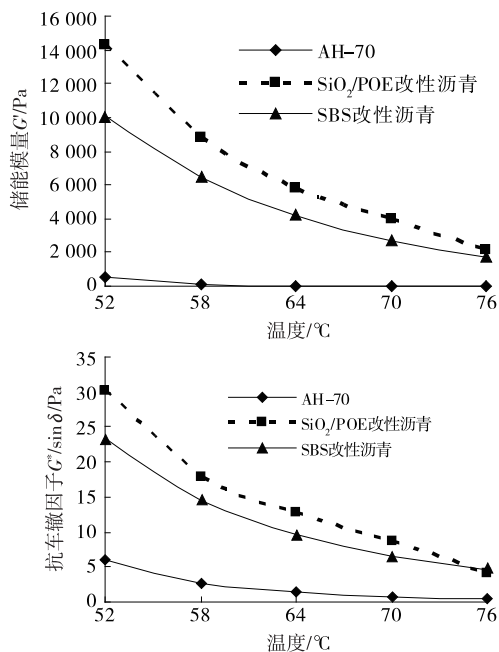


图 1 3 种沥青储能模量 G' 、抗车辙因子 $G^* / \sin \delta$ 对比

较低,弹性成分仍占主导作用。
由表 4 可知:1) SiO₂、POE 的掺加增加了基质沥青的蠕变劲度模量,提高了蠕变曲线变化率,改善了沥青的低温流变性能,提高了低温抗裂能力。同时,随着温度的降低(−24 ℃), S 值增加, m 值降低,说明在环境温度较低时,沥青的柔性变形和应力松弛能力将发生显著改变,温度越低,对沥青低温抗裂能力的要求越高。2) SiO₂/POE 复合改性沥青的低温性能稍劣于 SBS 改性沥青,在 −12 ℃ 时, S 值、 m 值均表现出相同的变化趋势,这可能是由于 SiO₂ 粒子阻碍了低温条件下沥青分子链段的运动,使沥青变形受阻,降低了沥青的低温性能。但根据 SHRP 指标评价等级, SiO₂/POE 复合改性沥青仍能满足中国大部分地区的要求。

3 SiO₂/POE 改性沥青混合料路用性能分析

3.1 混合料级配设计

采用 AC-20 型密级配(见表 5 和图 2)。按照 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》中马歇尔试验方法进行最佳油石比设计,70# 基质沥青混合料的油石比为 4.1%, SiO₂/POE 改性沥青混合料的油石比为 4.6%, SBS 改性沥青混合料的油石比为 4.4%。

表 5 AC-20 级配范围及其合成级配

级配类型	下列筛孔(mm)下的通过率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	100.0	90.0	82.0	70.0	46.0	36.0	28.0	22.0	16.0	12.0	7.0
级配下限	100	90.0	74.0	62.0	50.0	32.0	22.0	16.0	10.0	6.0	4.0	3.0
合成级配	100	92.1	87.7	77.3	61.0	36.9	28.9	18.6	14.3	7.5	6.3	5.3

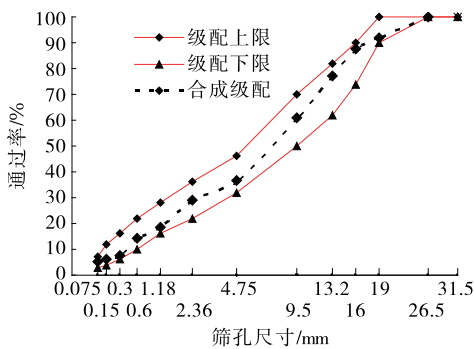


图 2 沥青混合料合成级配曲线

3.2 路用性能分析

3.2.1 高温稳定车辙试验分析

以动稳定度评价纳米 SiO₂/POE 复合改性沥青混合料的高温稳定性,以 AH-70 基质沥青混合料、

SBS 改性沥青混合料作为对比。试验结果见表 6。

表 6 3 种沥青混合料车辙试验结果

混合料类型	车辙深度/mm		动稳定度/(次·mm ⁻¹)	蠕变斜率 K
	45 min	60 min		
AH-70 沥青	4.321	4.682	1 745.2	0.009 10
SiO ₂ /POE 改性沥青	1.102	1.204	6 176.5	0.003 82
SBS 改性沥青	1.216	1.325	5 779.8	0.004 13

由表 6 可知:对基质沥青进行 SiO₂/POE 改性后,其动稳定度得到显著提高,总车辙深度明显降低。与基质沥青相比, SiO₂/POE 和 SBS 改性沥青的动稳定度分别提高 2.54、2.31 倍,总车辙深度降

低74%、72%,说明SiO₂/POE能改善基质沥青的抗车辙性能,其高温性能甚至优于SBS改性沥青混合料。蠕变斜率表示产生每毫米车辙需走过的碾压次数, K 值越小,表征沥青混合料抗永久变形的能力越强。3种沥青混合料中,SiO₂/POE改性沥青的 K 值最小,进一步验证了其高温性能。

3.2.2 高温抗剪 SPT 试验分析

SPT试验能有效描述沥青路面在一定条件下抵抗开裂和永久变形的能力,包括动态模量试验、重复加载试验和静态蠕变试验。为进一步验证SiO₂/

POE复合改性沥青混合料的高温性能,对3种沥青混合料进行SPT试验,评价指标为动态模量 E^* 、流变时间 F_t 和流变次数 F_n 。

3.2.2.1 动态模量试验分析

根据NCHRP-465,沥青路面的动态模量 E^* 与环境温度和行车速率(加载频率)有关,受行车荷载的影响较小;行车速度0~120 km/h对应的加载频率为1~10 Hz,在该范围内更能模拟现场实际情况。在60℃,1、5、10 Hz加载频率,138 kPa围压下对3种沥青混合料进行动态模量测试,结果见表7。

表7 3种沥青混合料动态模量测试结果

混合料类型	动态模量 E^* /MPa			相位角 φ /($^{\circ}$)			动态模量指标 K /MPa		
	1 Hz	5 Hz	10 Hz	1 Hz	5 Hz	10 Hz	1 Hz	5 Hz	10 Hz
AH-70 沥青	352	521	671	34.2	37.7	36.8	626.2	852.0	1 120.2
SiO ₂ /POE 改性沥青	596	1 076	1 346	28.3	26.8	25.3	1 257.2	2 386.5	3 149.6
SBS 改性沥青	571	1 125	1 223	29.4	28.4	26.2	1 163.2	2 365.3	2 770.1

E^* 和 K ($K=E^*/\sin\varphi$)越大,沥青路面的高温稳定性能越好。由表7可知:1) SiO₂/POE复合改性后显著提高了基质沥青的 E^* 和 K ,1 Hz加载频率下 E^* 和 K 分别提高69.3%、100%,10 Hz加载频率下分别提高100%、181.6%,且高于SBS改性沥青,说明通过SiO₂/POE改性能改善基质沥青的高温稳定性能。2) 加载频率(行车速度)对沥青混合料动态模量有显著影响, E^* 和 K 值随加载频率的增加而提高,与1 Hz加载频率时相比,5、10 Hz加载频率时,SiO₂/POE沥青混合料的 E^* 值分别提高80.5%和125.8%, K 值提高89.8%和150.5%,70#基质沥青的 E^* 值分别提高48.0%、90.6%, K 值提高36.0%和78.9%。加载频率对SiO₂/POE和SBS改性沥青动态模量的影响更显著,SiO₂/POE复合改性沥青混合料具有优异的高温抗车辙性能,其性能优于SBS改性沥青。

3.2.2.2 重复加载和静态蠕变试验分析

定义流变时间 F_t 、流变次数 F_n 分别为试验加载过程中试件轴向应变最小变化率所对应的时间和加载次数,即试件发生竖向应变时的作用时间和加载次数, F_t 值越小,更容易产生车辙; F_n 越大,产生额定竖向应变时的加载次数越多,沥青混合料的抗车辙性能越好。试验压力为0.7 MPa,围压为138 kPa,温度为60℃。试验结果见图3。

由图3可知:3种沥青混合料中,SiO₂/POE的

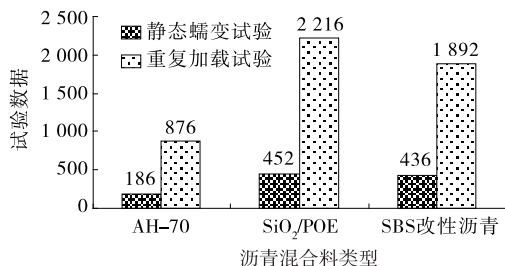


图3 3种沥青混合料静态蠕变和重复加载试验结果

F_t 和 F_n 值均最大,与基质沥青混合料相比,其 F_t 和 F_n 值分别提高143%、153%,沥青混合料的抗高温性能最佳,SiO₂/POE添加剂显著改善了基质沥青的高温性能,与上述动态模量指标分析结果一致。

3.2.3 低温弯曲试验

通过MTS试验验证SiO₂/POE复合改性沥青混合料的低温抗裂性,试验温度为-10℃,加载速率为50 mm/min。测试结果见表8。

由表8可知:与70#基质沥青混合料相比,SiO₂/

表8 3种沥青混合料低温弯曲试验结果

混合料类型	抗弯拉强度	极限破坏应	S_B /MPa
	R_B /MPa	变 ϵ_B	
AH-70 沥青	6.9	2 236	2 897.3
SiO ₂ /POE 改性沥青	14.2	3 579	3 768.1
SBS 改性沥青	15.7	3 216	4 216.0

POE 改性沥青混合料的抗弯拉强度 R_B 、极限破坏应变 ϵ_B 和 S_B 均得到提高,分别提高 105.8%、43.8% 和 45.5%,说明 SiO₂/POE 能改善基质沥青混合料的低温性能。与 SiO₂/POE 改性沥青混合料相比,SBS 改性沥青的 R_B 、 ϵ_B 和 S_B 分别提高 127.5%、60.1% 和 30.1%,说明 SiO₂/POE 复合改性沥青混合料的低温抗裂性能稍劣于 SBS 改性沥青混合料,但仍满足规范要求。

3.2.4 中温耐疲劳试验

疲劳破坏一直是沥青路面病害研究的重要对象,沥青混合料是否具有优良的抗疲劳性能直接关系到路面的使用寿命。采用低温弯曲疲劳试验对

SiO₂/POE 沥青混合料的疲劳性能进行验证,试验参数如下:半正弦波,10 Hz,试件尺寸为 50 mm×50 mm×250 mm,温度 15 ℃。试验结果见图 4,回归方程见表 9。

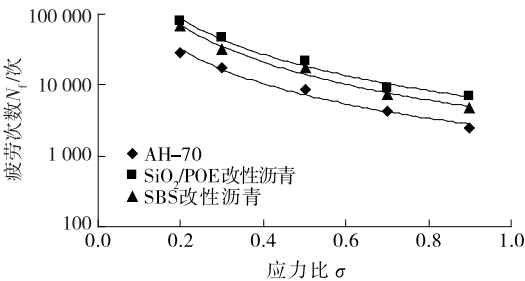


图 4 3 种沥青混合料疲劳次数与应力比之间的关系

表 9 3 种沥青混合料中温疲劳数据回归方程

混合料类型	疲劳方程	K 值	n 值	R ² 值
AH-70 沥青	$y=2\,362.1x^{-1.623\,1}$	2 362.1	1.623 1	0.984 0
SiO ₂ /POE 改性沥青	$y=5\,732.8x^{-1.691\,6}$	5 732.8	1.691 6	0.986 9
SBS 改性沥青	$y=4\,137.1x^{-1.769\,3}$	4 137.1	1.769 3	0.985 9

由图 4 可知:在应力测试范围内,3 种沥青混合料的疲劳曲线均呈线性关系;在一定应力比时,SiO₂/POE 复合改性沥青混合料的疲劳寿命最佳,70# 基质沥青的疲劳次数最小。说明 SiO₂/POE 改善了基质沥青的抗疲劳性能,且优于 SBS 改性沥青混合料,有助于延长沥青路面的使用寿命。疲劳次数 N_f 对应力比 σ 的变化具有一定的敏感性, N_f 随着应力比 σ 的增加而线性降低,在应力比为 0.3 时,与基质沥青相比,SiO₂/POE 的 N_f 提高 161%,且 N_f 增加幅度随应力比的增加而增加。

K 值反映沥青混合料的抗疲劳性能,其值越大,抗疲劳性能越好;n 值反映疲劳次数对应力比变化的敏感程度,其值越大,疲劳寿命受应力比的影响越严重。从表 9 可以看出:SiO₂/POE 改性沥青混合料的 K 值最大,SBS 改性沥青的 n 值最大,说明 SiO₂/POE 改性沥青混合料的抗疲劳性能最佳,SBS 改性沥青混合料疲劳次数对应力比变化的敏感性最显著。

3.2.5 冻融劈裂试验

采用冻融劈裂试验验证 SiO₂/POE 复合改性沥青混合料的水稳定性,试验结果见表 10。

由表 10 可知:SiO₂/POE 显著改善了基质沥青的水稳定性能,提高了冻融劈裂强度,提高约 7.5%;

表 10 3 种沥青混合料冻融劈裂试验结果

混合料类型	劈裂强度/MPa		冻融劈裂强度比 TSR/%
	冻融前	冻融后	
AH-70 沥青	0.816	0.723	88.6
SiO ₂ /POE 改性沥青	0.914	0.871	95.3
SBS 改性沥青	0.927	0.826	89.1

且其 TSR 值高于 SBS 改性沥青,尽管冻融前其劈裂强度低于 SBS 改性沥青,但经过冻融后,SBS 改性沥青的强度劣化较明显。说明 SiO₂/POE 改性沥青混合料具有优良的水稳定性能。

4 结论

(1) 纳米 SiO₂/POE 复合改性促使基质沥青的软化点、粘度和延度提高,针入度降低,高温稳定性得到提高,高温感温性下降;SiO₂/POE 复合改性沥青的储能模量 G' 、抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 均大于基质沥青和 SBS 改性沥青,进一步验证了 SiO₂/POE 能改善沥青的高温性能。

(2) SiO₂/POE 复合改性后增加了基质沥青的蠕变劲度模量和蠕变曲线变化率,改善了沥青的低温流变性能,提高了低温抗裂能力,但其低温性能稍劣于 SBS 改性沥青。

(3) 经 SiO_2/POE 复合改性后, 基质沥青的动稳定度得到显著提高, 总车辙深度明显降低, 动稳定度增加约 2.54 倍; 提高了基质沥青的动态模量 E^* 、流变时间 F_t 和流变次数 F_n , 进一步验证了其优良的抗车辙能力。

(4) SiO_2/POE 复合改性显著提高了基质沥青混合料的低温抗裂、耐疲劳及水稳定性能, 除低温抗裂性能指标稍劣于 SBS 改性沥青混合料外, 其他指标均最佳, 与沥青结合料性能验证结果一致。

参考文献:

- [1] 黄维蓉. 纳米层状硅酸盐改性沥青混合料路用性能试验研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(1).
- [2] 张志焜, 崔作林. 纳米技术与纳米材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [3] 姚辉, 李亮, 杨小礼, 等. 纳米材料改性沥青的微观和力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5).
- [4] 孙璐, 辛宪涛, 等. 可用于沥青改性的纳米材料综合比选[J]. 交通运输工程与信息学报, 2012, 10(2).
- [5] 孙培, 韩森, 张洪亮, 等. 纳米 CaCO_3/SBR 复合改性沥青及混合料的高温性能[J]. 材料导报, 2016, 30(4).

- [6] 刘大梁, 姚洪波, 包双雁. 纳米碳酸钙和 SBS 复合改性沥青的性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(3).
- [7] 陈宪宏, 刘杉, 孙立夫. 纳米二氧化硅与 SBR 复合改性乳化沥青的性能研究[J]. 橡胶工业, 2007, 54(6).
- [8] 马峰, 张超, 傅珍. 纳米碳酸钙改性沥青的路用性能及机理研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2007, 31(1).
- [9] van de Ven M F C, Molenaar A A A, Besamusca J. Nanoclay for binder modification of asphalt mixtures [A]. Proceedings of the 7th International Rilem Symposium on Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials[C]. 2009.
- [10] Transportation Research Board. NCHRP report 465: simple performance test for superpave mix design [R]. National Research Council, 2002.
- [11] Morea F, Agnusdei J, Zerbino R. Comparison of methods for measuring zero shear viscosity in asphalts[J]. Materials and Structures, 2010, 43(4).
- [12] 陈华鑫, 王向恒, 刚增军, 等. 纳米改性沥青的路用性能研究[J]. 公路工程, 2008, 33(3).

收稿日期: 2016-06-07

(上接第 66 页)

(2) 高温稳定性。采用 4.2% 最佳石油比沥青混合料进行高温稳定性试验, 试验结果见表 5。从中可见, AC-25 沥青混合料的高温稳定性满足技术要求。

表 5 AC-25 混合料高温稳定性试验结果

试件编号	变型量/mm		动稳定度/(次·mm ⁻¹)	
	45 min	60 min	试验值	规定值
A	2.133	2.376		
B	2.177	2.512	2 326	≥1 000
C	1.823	2.018		

4 结论

(1) 采用多级嵌挤型级配设计基本思想进行反复、动态计算, 可设计出满足不同面层的沥青混合料合理级配。

(2) 沥青混合料的毛体积密度、沥青饱和度随着油石比的增大而增大, 空隙率则呈现相反的趋势, 沥青含量对矿料间隙率的影响较小; 随着沥青含量的提高, 混合料的流值增加量略有增大, 沥青混合料

的高温抗变形能力降低; 各面层最佳沥青含量分别为上面层 5%、中面层 4.8%、下面层 4.2%。

(3) 下面层 AC-25 混合料的路用性能满足要求, 多级嵌挤型级配设计方法可行。

参考文献:

- [1] 彭波, 袁万杰, 薛鹏涛, 等. 多级嵌挤密实型沥青混合料路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2005, 24(6).
- [2] 陈忠达, 袁万杰, 高春海. 多级嵌挤密实级配设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1).
- [3] 陆学元, 张治锋. AC-25 沥青混合料矿料级配优化及应用研究[J]. 中外公路, 2009, 29(2).
- [4] 李肇昌. SBS 改性沥青混合料配合比优化及施工技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.
- [5] 彭庆跃, 陈星, 彭纲. 橡胶沥青混合料骨架嵌挤级配优化及配合比设计方法研究与应用[J]. 湖南交通科技, 2009, 35(4).

收稿日期: 2017-02-23