

适用于机场道面的复合改性沥青性能试验

石鑫刚¹, 蔡良才¹, 刘晓军¹, 许巍¹, 王新航², 杨玉杰³

(1.空军工程大学机场建筑工程系,西安.710038;2.山东新航公司,山东潍坊,261000;

3.西安市亚星土木仪器有限公司,西安,710043)

摘要 选用 4 种纳米材料与青川岩沥青结合,对基质沥青进行复合改性,通过沥青试验及混合料试验研究复合改性沥青的性能。沥青试验包括 3 大指标试验、旋转黏度试验、动态剪切流变试验、弯曲蠕变试验及旋转薄膜烘烤箱试验,沥青混合料试验包含车辙试验、浸航油稳定性试验、浸水稳定性试验和冻融劈裂试验等。沥青试验结果显示:与基质沥青及岩沥青改性沥青相比,复合改性沥青的针入度降低,低温延度下降,软化点和稠度提升,高温稳定性和抗老化性得到改善,但低温性能会有一定程度下降。混合料试验表明:岩沥青和纳米材料的加入使得混合料具有更高的抗车辙能力,抗水损害和抗航油侵蚀性能也得到提升。研究结果表明这种新型的复合改性沥青适应于非极端寒冷地区机场道面面层。

关键词 纳米材料;岩沥青;复合改性;沥青性能

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.04.003

中图分类号 U414 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)04-0013-06

A Study of Testing Composite Modified Asphalt Suitable for Airport Pavement

SHI Xin'gang¹, CAI Liangcai¹, LIU Xiaojun¹, Xu Wei¹, WANG Xinhang², YANG Yujie³

(1.Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Shandong Xinhang company, Weifang 261000, Shandong, China;

3. Xi'an Yaxing Civil Instrument Co Ltd, Xi'an 710043, China)

Abstract: This paper evaluates the properties of composite modified asphalt by selecting four kinds of nano-materials combined with composite modified the base bitumen with QingChuan rock asphalt. Asphalt experiments contain the three major indexes, rotational viscosity test, dynamic shear rheological test and bending beam rheometer test and rotating film drying oven test, and asphalt mixture tests include rutting test, oil immersion stability test, water immersion stability test and freeze-thaw splitting test. Compared with base bitumen and rock asphalt, the penetration and ductility of composite modified asphalt reduce while softening point increases. Nano-materials and rock asphalt can significantly improve the consistency of asphalt, high temperature performance as well as anti ageing property. But low temperature properties have adverse effects. The mixture test shows that the addition of rock asphalt and nano materials can improve the anti-rutting ability, anti water damage and anti erosion performance of aviation kerosene. The study shows that the composite modified asphalt meets the requirements of the technical indicators of airport pavement.

Key words: nano-materials; rock asphalt; composite modification; performance of asphalt

收稿日期: 2016-04-11

作者简介: 石鑫刚(1991—),男,山东新泰人,硕士生,主要从事机场施工与材料研究.E-mail:kgdwxs@163.com

引用格式: 石鑫刚,蔡良才,刘晓军,等.适用于机场道面的复合改性沥青性能试验[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(4):13-18. SHI Xin'gang, CAI Liangcai, LIU Xiaojun, et al. A Study of Testing Composite Modified Asphalt Suitable for Airport Pavement[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(4): 13-18.

与普通的沥青路面相比,机场沥青道面承受的飞机荷载大,试车、粗暴着陆的冲击及掉头转弯强扭矩作用对道面的影响更严重^[1]。道面老化后导致的集料松散脱落会对发动机的安全构成威胁,且航油泄露侵入混凝土影响其稳定性,同时机场道面宽度大,排水用时较长,面层受到的水损害作用也相对较为严重。因此机场沥青道面需要有更好的高温稳定性、抗老化性、抗航油侵蚀及抗水损害性^[2]。

岩沥青是由存在于山体、岩石裂隙的石油经过长期的沉淀硬化及地质变动而形成的天然沥青^[3]。岩沥青的掺加增强了基质沥青内聚力,大大提高了基质沥青的高温稳定性,降低了温度敏感性,但低温下容易开裂^[4-6]。纳米材料是由尺寸介于原子分子和宏观体系之间的纳米粒子组成的新一代材料^[7],其巨大的比表面积增加了结构沥青的数量,提高了沥青的高温稳定性;特殊的表面及界面效应使改性沥青低温性能改善,触变性增加,提高了耐久性^[8-10]。用岩沥青与纳米材料对基质沥青进行复合改性,是一种新型的改性沥青制备思路和方法,已有的试验结果显示,纳米材料可以使岩沥青改性沥青的高温性能和抗老化性能进一步提升,且增加了混合料的抗水损害和抗航油侵蚀性能,复合后的改性沥青适用于非极端寒冷地区的机场道面。

1 试验准备

1.1 原材料的选取

改性沥青中广泛应用的纳米材料有 A(纳米碳酸钙)、B(纳米二氧化硅)、C(纳米二氧化钛)和 D(纳米蒙脱土)4种^[11-12],分别与青川岩沥青(QC)结合对基质沥青(J)进行复合改性。岩沥青选用青川岩沥青,由四川舜天矿业技术研发部研发。青川岩沥青与纳米材料的参数见表1~2。

表1 青川岩沥青参数

Tab. 1 Parameter list of Qingchuan rock asphalt

测试指标	沥青含量/%	灰分/%	密度/(g·cm ⁻³)	闪点/℃	加热损失/%	含水量/%
测试结果	97.6	0.43	1.10	> 260	0.542	0.3

表2 纳米材料参数

Tab. 2 Parameter list of nano-materials

纳米材料种类	外观	纯度/%	平均粒径/nm	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)
A	白色粉体	98.0	75	40
B	白色粉体	99.8	30	200 ± 35
C	白色粉体	99.0	18	55
D	白色粉体	97.0	100	30

1.2 改性沥青的制备

称取一定质量的基质沥青(不少于500g),加热

到170℃^[13],再称取一定质量的青川岩沥青,成块的青川岩沥青融化到基质沥青中,加入一定质量的纳米材料,人工搅拌10min,保证材料混溶,再在170℃下以5000r/min的转速高速剪切20min,表面呈镜状后取样。参考岩沥青改性沥青和纳米材料改性沥青的相关研究成果^[14-17],材料用量见表3,并采用AC-16I型级配对这6种沥青制备混合料。

表3 试验组号及材料用量

Tab. 3 Test code and material composition

组号	1	2	3	4	5	6
材料	J	J+6%	J+6%QC	J+6%QC	J+6%QC	J+6%QC
用量		QC	+3%A	+3%B	+3%C	+3%D

2 试验方法与结果分析

2.1 试验方法

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,对改性沥青及沥青混合料进行表4中试验。

表4 沥青及沥青混合料性能试验

Tab. 4 Tests of asphalt and asphalt mixture performance

试验项目	测试指标	试验方法
针入度试验	25℃针入度	T 0604-2011
	针入度指数	
软化点试验	软化点	T 0606-2011
延度试验	10℃延度	T 0604-2011
旋转黏度试验	135℃旋转黏度	T 0625-2011
动态剪切流变试验	复数剪切模量、相位角、车辙因子	T 0628-2011
低温弯曲蠕变试验	蠕变劲度模量S值	T 0627-2011
	蠕变曲线斜率m值	
旋转薄膜烘烤箱试验	质量损失、残留针入度比、10℃延度	T 0610-2011
车辙试验	车辙变形、动稳定度	T 0719-2011
浸航油稳定性试验	浸航油稳定系数	T 0709-2011
浸水稳定性试验	残留稳定度	T 0709-2011
冻融劈裂试验	劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比	T 0729-2000

2.2 沥青试验结果分析

2.2.1 三大指标试验结果分析

表5为三大指标试验结果。通过对针入度试验结果的分析发现,掺加岩沥青后,基质沥青的针入度下降明显,并且加入纳米材料后,复合改性沥青的针入度继续呈下降趋势。另外岩沥青改性沥青的针入度指数增大,表明其温度敏感性降低,纳米材料的加入可以进一步增大针入度指数,降低温度敏感性。掺加岩沥青使基质沥青的软化点升高了6.8℃,与纳米材料复合后软化点又进一步得到提升,表明复合改性沥青具有优良的高温性能。其中,岩沥青与

纳米二氧化硅复合改性沥青的软化点高达 75.9 °C,比基质沥青高出 16.5 °C。但从延度指标来看,加入岩沥青和纳米材料会使延度大幅度下降,基质沥青的延度是复合改性沥青的 3 倍多,10°C 延度指标的下降表明改性沥青的低温性能受到一定的影响,4 种纳米材料相对而言,岩沥青与纳米二氧化硅的延度下降最小。

表 5 三大指标试验结果

Tab. 5 Results of physical properties test

组号	25°C 针入度/0.1 mm	针入度指数	软化点/°C	10°C 延度/mm
1	70.3	-0.66	59.4	616
2	45.0	-0.55	66.2	146
3	42.9	0.29	71.3	127
4	40.7	0.84	75.9	134
5	34.8	0.25	72.2	100
6	40.3	-0.29	69.1	119

2.2.2 旋转黏度试验结果分析

从图 1 可知,6 种沥青的 135 °C 旋转黏度均满足 ASTM D4402 推荐的不大于 3 Pa·s 的要求,尤其是岩沥青与纳米二氧化硅复合改性沥青的旋转黏度较基质沥青提高了 1 倍,表明在保证施工和易性的基础上,高温性能得到较大提升。另外 3、4、5、6 这 4 类复合改性沥青的旋转黏度值比岩沥青改性沥青分别高出 20.5%、45.1%、30.0% 和 4.1%,复合改性沥青抵抗外力作用变形的能力更强。

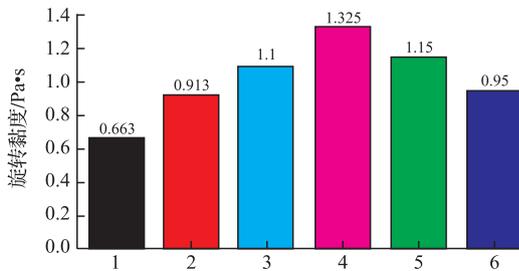


图 1 135°C 旋转黏度

Fig.1 Rotation viscosity at 135°C

2.2.3 动态剪切流变试验结果分析

从图 2、图 3 及表 6 可以看出:

1) 同等温度下,5 种改性沥青的 G^* 较基质沥青高,复合改性沥青的 G^* 也高于单一的岩沥青改性沥青,表明复合改性沥青在高温下抵抗变形的能力更强,其中岩沥青与纳米二氧化硅复合改性沥青的 G^* 最大,高温下最稳定。

2) 同等温度下,5 种改性沥青的 δ 比基质沥青小,4 种复合改性沥青中,仅有岩沥青与纳米二氧化硅复合改性沥青的 δ 比岩沥青改性沥青小,表明在相同温度下,改性沥青能够提供抗剪切性能的弹性

分量,岩沥青与纳米二氧化硅复合改性沥青的高温弹性能力最强。

3) 同等温度下,各种改性沥青的车辙因子的数值比基质沥青高出近 1 倍,其中岩沥青与纳米二氧化硅复合改性沥青的车辙因子的数值最高,其混合料的抗高温车辙永久变形的能力最强。

4) 6 种沥青的高温等级次序为 4>6>5>3>2>1,岩沥青与纳米二氧化硅复合改性沥青的高温稳定性最好。

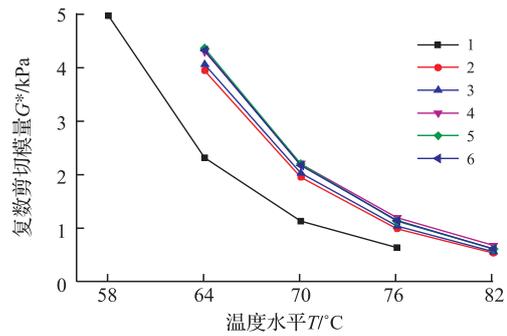


图 2 不同沥青的复数剪切模量 G^*

Fig.2 Complex shear modulus for all different asphalts

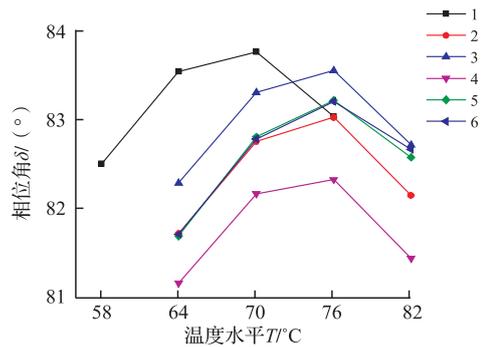


图 3 不同沥青的相位角 δ

Fig.3 Phase angle of for all different asphalts

表 6 DSR 试验的车辙因子

组号	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C	82 °C
1	5.055	2.366	1.173	0.672	—
2	—	4.025	2.004	1.034	0.569
3	—	4.132	2.076	1.079	0.595
4	—	4.397	2.259	1.241	0.714
5	—	4.451	2.249	1.174	0.647
6	—	4.41	2.223	1.182	0.654

2.2.4 低温弯曲蠕变试验结果分析

由表 7 可知,在 -12 °C 时,6 种沥青 60 s 时的 S 和 m 值均满足 SHRP 规范推荐的 $S < 300$ MPa, $m > 0.3$ 的要求。基质沥青具有最低的 S 值,表明基质沥青具有更好的低温柔性,岩沥青的掺加使得劲度增大,低温柔性降低,而岩沥青和纳米材料的复合使得改性沥青的劲度进一步增大,因此复合改性

沥青的低温性能会有一定程度的下降。基质沥青的 m 值最大,表明基质沥青最不易积累低温应力,在低温下最不易开裂。5种改性沥青的 m 值均小于基质沥青,且纳米材料的加入,会使 m 值进一步减小,复合改性沥青的低温性能会有一定下降,并不适用于极端寒冷地区。

表7 低温弯曲蠕变试验结果

Tab.7 Test results of BBR test

组号	弯曲蠕变劲度模量 S/MPa			蠕变曲线的斜率 m		
	-12 °C	-18 °C	-24 °C	-12 °C	-18 °C	-24 °C
1	148.69	301.54	496.05	0.623	0.464	0.403
2	219.94	424.61		0.527	0.438	
3	238.23	424.92		0.503	0.381	
4	292.31	599.93		0.470	0.307	
5	291.67	503.31		0.452	0.326	
6	288.63	619.39		0.414	0.314	

表8 旋转薄膜烘烤箱试验结果

Tab.8 Test results of RTFOT

组号	老化前			老化后				
	质量 /g	25 °C 针入度 /0.1mm	10 °C 延度 /mm	质量损失 $L_T/\%$	25 °C 针入度 /0.1 mm	残留针入度 比 $K_P/\%$	残留 10 °C 延度/mm	残留 10 °C 延度比 $D_T/\%$
1	35.32	70.3	616	0.61	45.3	64.4	319.3	51.83
2	35.02	45.0	146	0.55	30.8	68.4	110	75.34
3	35.51	52.9	127	0.42	35.4	66.9	100	78.74
4	35.93	40.7	134	0.36	26.3	64.6	126.7	94.55
5	35.97	34.8	120	0.32	23.6	67.8	104	86.67
6	35.24	40.3	119	0.27	26.2	65.0	106	89.08
技术指标		基质沥青	>100	$\leq \pm 0.8$		≥ 61	≥ 60	
		改性沥青	>100	$\leq \pm 1.0$		≥ 50		

2.3 沥青混合料试验结果分析

2.3.1 车辙试验结果分析

与公路沥青路面相比,机场道面承受的飞机轮载大,B777飞机的主轮荷载能达到 1.5 MPa,因此车辙试验设置温度 60 °C,在 0.7 MPa、0.9 MPa、1.1 MPa、1.3 MPa、1.5 MPa 共 5 个荷载水平下测试。计算的动稳定度(DS)见图 4。

可以看出,随着荷载的增大,沥青混合料的 DS 下降。相同轮载下,岩沥青改性沥青比基质沥青的 DS 高出 2 倍,具有良好的抗车辙性能。随着纳米材料的掺加,DS 进一步增大,但提高的效果并不明显。不同轮载下,同一种沥青,0.7 MPa 下的 DS 近似为 1.3 MPa 和 1.5 MPa 下的 2 倍和 3 倍。复合改性沥青均满足 0.7 MPa 下大于 3 000 次/mm 的规范要求,其中岩沥青与纳米二氧化硅改性沥青的 DS 可达 3 783 次/mm。

2.2.5 旋转薄膜烘烤箱试验(RTFOT)

RTFOT 试验结果见表 8。结果表明 6 种沥青的质量损失及残留针入度比都能满足规范要求,复合改性沥青的 L_T 减小, K_P 增大,岩沥青及纳米材料的掺加可以提高基质沥青的抗老化性。延度损失方面,基质沥青的延度下降明显,损失 48.17%,但延度数值仍然是改性沥青的近 3 倍,说明其抗老化能力有所下降,但低温延度仍然比改性沥青要好。而改性沥青的延度损失小,尤其是岩沥青与纳米二氧化硅复合改性沥青延度仅损失 5.45%,具有良好的抗老化性能。

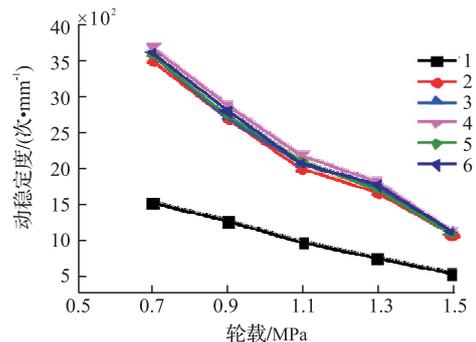


图4 不同沥青在不同轮载下的动稳定度

Fig.4 Dynamic stability of 6 kinds of asphalts under different loadings

2.3.2 浸航油稳定性试验结果分析

按照浸水马歇尔试验方法,设计浸航油稳定性试验。设置两组试验:第 1 组马歇尔试件放入 60 °C 水槽中 0.5 h 后测定其马歇尔稳定度 MS_1 ;第 2 组马歇尔试件放入 60 °C 航油中 0.5 h 后,将表面航油擦干,待航油挥发后,测定其马歇尔稳定度 MS_2 ,并按式(1)

计算浸航油稳定系数 H 。试验结果见表 9。

$$H = \frac{MS_2}{MS_1} \quad (1)$$

表 9 浸航油稳定性试验结果

Tab.9 Test results of leaching aviation kerosene stability

组号	MS/kN		H
	浸航油前	浸航油后	
1	7.56	5.98	0.791
2	12.45	10.45	0.839
3	13.56	11.97	0.883
4	13.34	12.06	0.904
5	14.43	13.12	0.909
6	13.52	12.02	0.889

分析上述试验结果得出,浸航油后沥青混合料的 MS 都会下降,从 H 的大小可以看出,航油对基质沥青的影响最大,岩沥青的掺加可以减少航油侵蚀,而纳米材料的体积效应和量子隧道效应可使其产生渗透作用,在沥青与骨料的界面其活性得到很好的发挥,沥青混合料更加稳定,耐航油侵蚀性能得到较大提高。

2.3.3 抗水损害性能试验结果分析

为了评价复合改性沥青的抗水损害性能,采用浸水稳定性试验和冻融劈裂试验进行综合评价。试验结果见表 10~11。

表 10 浸水稳定性试验结果

Tab.10 Test results of leaching water stability

组号	马歇尔稳定度/kN		残留稳定度 MS_0
	浸水前	浸水后	
1	7.56	6.48	0.857
2	12.45	11.30	0.908
3	13.56	12.55	0.926
4	13.34	12.43	0.932
5	14.43	13.59	0.942
6	13.52	12.46	0.922

表 11 冻融劈裂试验结果

Tab.11 Test results of freeze-thaw splitting

组号	劈裂抗拉强度 \bar{R}_{T2} /MPa		残留强度比(TSR)
	冻融前	冻融后	
1	0.936	0.734	0.784
2	1.055	0.894	0.847
3	1.127	1.026	0.910
4	1.108	0.979	0.884
5	1.215	1.087	0.895
6	1.168	1.009	0.864

可以得出,沥青混合料在浸水后残留稳定度 MS_0 下降,冻融后劈裂抗拉强度下降。岩沥青的掺加提高了沥青的稳定度和劈裂抗拉强度,且浸水后

的 MS_0 比及 TSR 分别较基质沥青增大 5.1% 和 7.7%,纳米材料的界面效应进一步增强这种趋势,4 种复合改性沥青的 MS_0 较基质沥青提高 6.8%、7.5%、8.5%、6.4%,TSR 较基质沥青提高 12.6%、9.9%、11.0%、8.0%,具有更好的抗水损害能力。

3 结论

本文研究了岩沥青与纳米材料复合改性沥青的性能,通过试验结果分析得到以下结论:

1)复合改性沥青的针入度降低,低温延度下降,软化点升高,旋转黏度增大,车辙因子增加,动稳定度提高,纳米材料和岩沥青的掺加提高了沥青的稠度,使沥青的高温性能和抗老化性能得到较大提升,抗航油侵蚀和抗水损害的能力增强,但低温性能会受到一定的影响,可用于非极端寒冷地区机场道面面层。

2)5 种改性沥青中,岩沥青与纳米二氧化硅复合改性沥青的旋转黏度和车辙因子最大,表明其高温稳定性最好。并且与其他改性沥青相比,其针入度指数大,温度敏感性好,10 °C 延度值较大,老化后残留延度较大,动稳定度最大,具有良好的抗浸航油及抗水损害性能,且低温性能下降相对较小,值得进一步深入研究。

参考文献(References):

[1] 王振辉,蔡良才,刘晓军,等. 机场薄层沥青道面荷载应力和位移分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2007, 8(5):9-12.
WANG Zhenhui, CAI Liangcai, LIU Xiaojun, et al. An Analysis of Airfield Thin Layer Asphalt Pavement for Loading Stress and Displacement[J]. Journal of Air Force Engineering University ;Natural Science Edition, 2007, 8(5):9-12. (in Chinese)

[2] 史保华,蔡良才,王声,等. 改性沥青在机场道面的应用分析[J]. 公路,2003,6:124-128.
SHI Baohua, CAI Liangcai, WANG Sheng, et al. Analysis of Modified Asphalt Application in Airport Runways[J]. Highway, 2003, 6:124-128. (in Chinese)

[3] 沈金安. 改性沥青与 SMA 路面[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
SHEN Jin'an. Modified Asphalt and SMA Pavement [M]. Beijing: China Communication Press, 1999.(in Chinese)

[4] AMERI M, MANSOURIAN A, Sheikhmotevali A H. Investigating Effects of Ethylene Vinyl Acetate and Gilsonite Modifiers upon Performance of Base

- Bitumen using Superpave Tests Methodology [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 1001-1007.
- [5] LI Ruixia, KARKI P, HAO Peiwen, et al. Rheological and Low Temperature Properties of Asphalt Composites Containing Rock Asphalts [J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 47-54.
- [6] KOK B V, YILMAZ M, GULER M. Evaluation of High Temperature Performance of SBS + Gilsonite Modified Binder[J]. Fuel, 2011, 90: 3093-3099.
- [7] 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.
ZHANG Zhikun, CUI Zuolin. Nano-technologies and Nano-materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [8] 叶超, 陈华鑫. 纳米 SiO₂ 和纳米 TiO₂ 改性沥青路用性能研究[J]. 新型建筑材料, 2009(6): 82-84.
YE Chao, CHEN Huaxin. Study on Road Performance of Nano SiO₂ and Nano TiO₂ Modified Asphalt [J]. New Building Material, 2009(6): 82-84. (in Chinese)
- [9] 孙璐, 辛宪涛, 王鸿遥, 等. 纳米材料改性沥青路用结合料的性能[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(18): 1095-1101.
SUN Lu, XIN Xiantao, WANG Hongyao, et al. Performance of Nanomaterial Modified Asphalt as Paving Materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(18): 1095-1101. (in Chinese)
- [10] 陈宪宏, 刘杉, 孙立夫. 纳米二氧化硅 SBR 复合改性乳化沥青的性能研究[J]. 橡胶工业, 2007, 54(6): 337-340.
CHEN Xianhong, LIU Shan, SUN Lifu. Preparation and Properties of Emulsion Asphalt Modified by Nano-silica/SBR Composite[J]. China Rubber Industry, 2007, 54(6): 337-340. (in Chinese)
- [11] 葛守飞, 张洪亮. 纳米改性沥青综述[J]. 公路交通科技, 2013, 11: 39-46. (in Chinese)
GE Shoufei, ZHANG Hongliang. Review of Nano-modified Asphalt [J]. Technology of Highway and Transport, 2013, 11: 39-46. (in Chinese)
- [12] 王昊鹏, 龚明群, 杨军, 等. 纳米改性沥青研究进展[J]. 石油沥青, 2015, 29(3): 51-58.
WANG Haopeng, GONG Mingqun, YANG Jun, et al. Advances in Nanometer Modified Asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2015, 29(3): 51-58. (in Chinese)
- [13] 孙璐, 朱浩然, 辛宪涛, 等. 纳米改性沥青制备和路用性能研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 15-22.
SUN Lu, ZHU Haoran, XIN Xiantao, et al. Preparation of Nano-Modified Asphalt and Its Road Performance Evaluation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 15-22. (in Chinese)
- [14] 黄刚, 何兆益, 胡诚, 等. 基于微观和流变分析的岩沥青改性沥青性能评价[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(2): 367-372.
HUANG Gang, HE Zhaoyi, HU Cheng, et al. Performance Evaluation of Rock Modified Asphalt Based on Analysis of Microstructure and Rheological Property [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(2): 367-372. (in Chinese)
- [15] YILMAZ M, CELOGLU M E. Effects of SBA and Different Natural Asphalt on Properties of Bituminous Binders and Mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 533-540.
- [16] 张亚鹏. 天然改性沥青及其混合料应用性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
ZHANG Yapeng. Natural Modified Asphalt and Its Mixture Application Performance Research [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [17] 孙璐, 辛宪涛, 王鸿遥, 等. 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): 1-5.
SUN Lu, XIN Xiantao, WANG Hongyao, et al. Comprehensive Comparison of Nano-Materials for Asphalt Modification [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2012, 10(2): 1-5. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)