

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.05.005

不同矿粉对沥青胶浆的模量增效研究

任俐璇

(山东交通职业学院, 山东 潍坊 261206)

摘要: 采用不同产地的石灰岩矿粉、火山灰、拌和站回收粉, 对其配置的沥青胶浆进行了研究。通过常规指标和流变性质检测分析认为: 矿粉对基础沥青起到明显的模量增效行为, 但对石油沥青和SBS改性沥青具有不同的影响特点, 在高温剪切状态下, 矿粉不改变石油沥青的黏、弹性组成, 而改变了改性沥青的黏弹组成。同时, 不同矿粉决定了沥青胶浆的模量增效速率; 当矿粉亲水系数大于1或亚甲蓝值大于12后, 不再会对沥青胶浆物理指标(稠度、软化点)变化提供更多的改善行为。但不管矿粉的亲油能力如何, 它对基础沥青的模量增效效果是有限的, 不会达到天然沥青带来的改性效果。

关键词: 道路工程; 沥青胶浆; 模量增效; 矿粉性质

中图分类号: U414.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2015)05-0025-06

Study on Modulus Increasing Effect of Asphalt Mortar by Different Kinds of Mineral Powder

REN Li-xuan

(Shandong Transport Vocational College, Weifang Shandong 261206, China)

Abstract: A series of asphalt mortar which made of different kinds of limestone mineral filler, volcanic ash and recycled filler from different regions is studied. The analyzing result of Conventional index and rheological property detection shows that (1) Filler can significantly increase the modulus effect of matrix asphalt, but it has different effects on petroleum asphalt and SBS modified asphalt, in high temperature shear state, mineral powder will not change the viscoelasticity component of petroleum asphalt but change that of modified asphalt. (2) Modulus increasing rates affected by different kinds of mineral filler are different. When hydrophilic index of mineral filler is more than 1 or MBV is more than 12, mineral filler cannot longer improve the physical indicators of asphalt mastic such as consistence and softening point. Whatever its lipophilic ability, mineral filler has a limited contribution to modulus increasing effect of matrix asphalt and cannot reach a modification effect like natural asphalt.

Key words: road engineering; asphalt mortar; modulus increasing effect; mineral powder property

0 引言

沥青混合料中的矿质填料通常指矿粉, 它依靠非常大的表面积与沥青结合, 从而避免沥青的流淌, 并形成沥青胶浆混合料, 在真正意义上起到沥青混合料的黏结作用^[1]。文献研究通常认为, 矿粉可以增加沥青胶泥的模量, 提高软化点和模量值, 对提升混合料整体强度有很大影响, 沥青胶泥作为一个

材料系统对沥青混合料的水稳定性有着直接的影响^[2-4]。但这些研究很少对矿粉物理指标进行讨论, 加之我国行业技术规范中仅仅强调矿粉的细度, 如0.6, 0.15, 0.075 mm 粒径之下的粒度范围, 对其物理指标也仅限于密度、含水量、外观、亲水系数、塑形指数等^[1]远远不如国外标准要求得多。因此, 我国对矿粉的研究还需要重视。

本文通过常规指标和流变性质的研究, 研究不

收稿日期: 2015-01-04

作者简介: 任俐璇(1981-), 女, 山东莱州人, 硕士研究生。(renlixuan0119@126.com)

同矿粉的物理指标及其对沥青胶浆模量增效的影响模式,并与天然沥青粉进行性能对比,考察矿粉对沥青的改性效果。

1 原材料及试验安排

1.1 沥青

本文采用两种基质沥青和两种改性沥青为考察对象,其中基质沥青为中海 36-1 基质沥青(ZH70)和韩国双龙 70 号(SL70) A 级沥青, SBS 改性沥青为山东华瑞道路材料公司、山东路通公司提供的 1-D 类(分别记为 SBS-I, SBS-II)。两种沥青的性能指标见表 1。

表 1 石油沥青及改性沥青特性

Tab. 1 Properties of petroleum asphalts and modified asphalts

沥青指标	ZH70	SL70	SBS-I	SBS-II
25℃针入度/(0.1 mm)	63	70	54	55
针入度指数	-1.469	-1.178	0.3	-0.015
软化点/℃	46	46	74	73
5℃延度/cm	—	—	35	34
10℃延度/cm	>100	65	—	—
60℃黏度/(Pa·s)	196	198	—	—
135℃黏度/(Pa·s)	—	—	2.6	2.8
闪点/℃	270	340	328	330
溶解度/%	99.96	99.98	99.85	99.1
15℃密度/(g·cm ⁻³)	1.014	1.039	1.033	1.032
老化后质量变化/%	-0.031	0.06	-0.06	-0.06
老化残留针入度比/%	82.5	84	83	80
5℃老化残留延度/cm	—	—	25	27
10℃老化残留延度/cm	15	14	—	—

1.2 矿粉

试验采集了一些石灰岩矿粉、火山灰、不同石质的回收粉,代号及物理指标如表 2 所示,其中两种石灰岩质矿粉采自山东长青(CQ)、阳谷料场(YG),石灰岩回收粉(SHH)及玄武岩质回收粉(XW)采集自山东路桥养护公司济南拌和站,火山灰采自吉林白山砾子河。为胶浆配置和考察的严谨,所有矿粉均过 0.075 mm 筛孔。其中,矿粉的亚甲蓝值并未在我国公路沥青路面施工技术规范中规定^[5],但在公路工程集料试验中用于体现细集料的洁净程度,其目的在于确定矿粉中的膨胀性黏土矿物含量,以 MBV 值表示^[6]。数据表明,在火山灰和回收矿粉中,MBV 值较高,黏土含量两倍多于两种石灰岩矿粉;同时,石灰岩质矿粉随着 MBV 值的提

高,即黏土含量的增加,矿粉的亲水系数有所增高,亲油能力衰减。

表 2 矿粉亚甲蓝值和亲水系数

Tab. 2 MBV values and hydrophilic coefficients of different kinds of mineral powder

矿粉类型	粒径范围/mm	MBV 值/(g·kg)	亲水系数
石灰岩矿粉(CQ)	<0.075	4.17	0.769 2
石灰岩矿粉(YG)	<0.075	5	0.920 6
石灰岩质回收粉(SHH)	<0.075	11.67	1.500 0
玄武岩质回收粉(XW)	<0.075	10	—
火山灰(LZH)	<0.075	14.17	1.066 7

1.3 沥青胶浆配置与性能检测

在胶浆配置中,选取 0.075 mm 筛孔以下的矿粉使用,并予 105℃烘干,使整体矿粉干燥、能够自由流淌。配置程序为:在拌和温度下,将沥青加热融化,一边将热矿粉缓慢加入,一边搅拌,直至形成均匀胶浆样品,制样检测。主要检测的物理指标为针入度、软化点;并利用动态剪切流变仪对其 50℃下的黏弹性参数进行了采集,所采用仪器为 AR2000EX 动态剪切流变仪,试验温度 60℃,平行板 25 mm,间隙 1 mm,应力 100 Pa,剪切频率 10 rad/s。表 3 为不同沥青胶浆的常规指标数据,表 4 为 60℃下的黏弹性数据。

表 3 不同矿粉胶浆的物理特性

Tab. 3 Physical properties of mortar with different kinds of mineral powder

胶浆类型	物理特性	粉胶比 f_a					
		0	0.4	0.7	1	1.3	1.6
ZH70-CQ	针入度/(0.1 mm)	63	—	44.8	34.7	26	—
	软化点/℃	46	—	49.5	54	57.8	—
SL70-LZH	针入度/(0.1 mm)	70	55	46	37	31	26
	软化点/℃	46	50	51	54.9	60.6	68.6
SL70-CQ	针入度/(0.1 mm)	70	61	50.3	43.3	36	30.3
	软化点/℃	46	47.7	49.7	50.8	55.1	58.8
SL70-SHH	针入度/(0.1 mm)	70	59	—	41	—	20
	软化点/℃	46	48.5	—	51.8	—	70
SBS-I-CQ	针入度/(0.1 mm)	44.1	—	38.4	28.9	23.4	—
	软化点/℃	87	—	86.5	95.6	97.5	—
SBS-II-YG	针入度/(0.1 mm)	52	46	—	32	—	24
	软化点/℃	79.5	85.8	—	90.7	—	97.6
SBS-II-CQ	针入度/(0.1 mm)	52	46	40	33	28	23
	软化点/℃	79.5	83.1	85.2	87.5	91.5	96.1
SBS-II-XW	针入度/(0.1 mm)	52	42	36	29	24	—
	软化点/℃	79.5	87.2	90.6	92.1	96.6	—

表4 不同沥青及矿粉胶浆的 60 °C流变测试结果

Tab. 4 Rheology test data of mortar with different kinds of asphalt and mineral powder at 60 °C

粉胶比 f_a	ZH70 - YG		ZH70 - CQ		SBS - I - CQ		SBS - II - CQ	
	G^*/Pa	$\delta/(\circ)$	G^*/Pa	$\delta/(\circ)$	G^*/Pa	$\delta/(\circ)$	G^*/Pa	$\delta/(\circ)$
0	2 923	86.2	2 923	86.2	8 689.3	64.9	7 999.2	68.4
0.6	4 173	86.9	5 226.4	86.4	23 320	59.9	14 784.2	59.4
1	6 640	86.9	8 680.8	86.2	40 448.8	54.7	26 569.7	55.8
1.6	11 940	87	13 283.5	85.9	90 908.8	48.8	51 674.2	52.1

2 结果与讨论

2.1 矿粉的模量增效

(1) 针入度、软化点

图1为沥青胶浆的针入度、软化点变化趋势图。可以看到,胶浆针入度随着粉胶比的增长而呈线性降低的趋势,软化点则随粉胶比增长而线性升高;ZH70, SBS - I, SBS - II 改性沥青胶浆的变化特征也是如此。从中可以归纳这两个常规指标随粉胶比的拟合公式(详见表5),发现其拟合关系良好,且都呈现出式1所述关系。

$$y = a \times f_a + b, \quad (1)$$

式中, y 为胶浆的针入度或软化点; f_a 为粉胶比; a , b 为拟合系数。

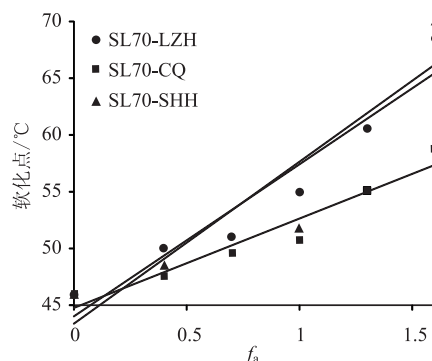
当 y 为针入度时, a 为负值,其物理意义为针入度衰减率,截距 b 等同于基础沥青的针入度;当 y 为软化点时, a 为正值,代表软化点增效速率,截距 b 等同于基础沥青的软化点。此处截距系数与基础沥青指标的相关性可用图2(由表5数据绘制)表明,两者间的相关系数大于99%。

表5 沥青胶浆针入度、软化点拟合公式

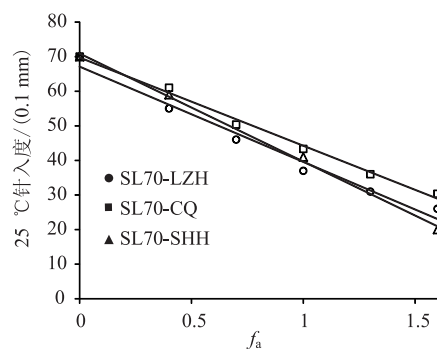
Tab. 5 Fitting formulas of penetration and softening point of asphalt mortar

沥青胶浆	针入度		软化点	
	拟合公式	R^2	拟合公式	R^2
ZH70 + CQ	$y = -26.537x + 62.028$	0.994 0	$y = 8.5467x + 45.415$	0.979 8
SL70 + CQ	$y = -25.5x + 69.75$	0.993 2	$y = 7.875x + 44.763$	0.933 7
SL70 - SHH	$y = -31.224x + 70.918$	0.997 4	$y = 14.269x + 43.373$	0.842 9
SL70 - LZH	$y = -27.538x + 67.115$	0.978 9	$y = 13.398x + 44.018$	0.920 2
SBS - I - CQ	$y = -15.327x + 45.195$	0.969 1	$y = 8.4579x + 85.307$	0.781 3
SBS - II - YG	$y = -18.163x + 52.122$	0.987 7	$y = 10.87x + 80.247$	0.987 6
SBS - II - CQ	$y = -18.692x + 52.577$	0.996 1	$y = 10.00x + 78.813$	0.975 2
SBS - II - XW	$y = -21.634x + 51.311$	0.995 7	$y = 12.35x + 80.799$	0.961 3

(2) 黏弹性参数。图3中的不同沥青胶浆在



(a) 软化点



(b) 针入度

图1 沥青胶浆的针入度、软化点变化曲线

Fig. 1 Curves of penetration and softening point of asphalt mortar

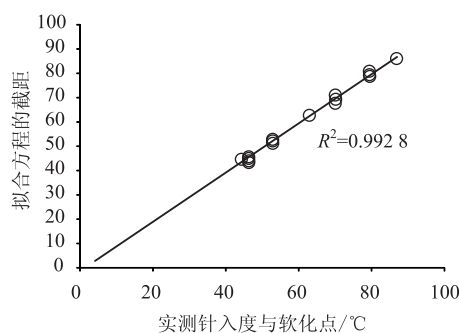


图2 基础沥青物理指标与曲线截距的关系

Fig. 2 Relationship between intercept and physical index of matrix asphalt

60 °C 下的模量变化表明,沥青胶浆的复合模量均随着粉胶比的增大而呈指数增长方式,矿粉对沥青的模量增效行为是十分显著的,无论石油沥青还是 SBS 改性沥青,都具有相同的模量增长规律。

然而,随着粉胶比的变化,石油沥青和 SBS 沥青的黏弹性组成发生了不同的变化,见图3(b)。在试验粉胶比 0.6 ~ 1.4 范围内,两种石油沥青胶浆的相位角基本保持不变,均在 86° 附近,黏性分量一直占据主要成分,这就表明此时的沥青胶浆体系仍

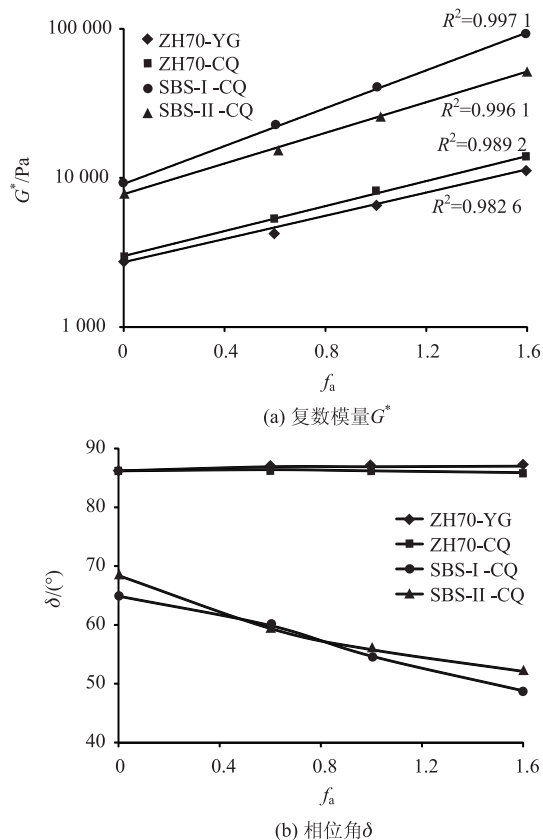


图3 沥青胶浆的高温黏弹性参数

Fig. 3 High temperature viscoelastic parameters of asphalt mortar

处于一接近黏流体的状态^[7]。而在同样粉胶比下,两种SBS沥青胶浆相位角则随着粉胶比的增大而单调降低,添加粉胶比为1的矿粉时,胶浆相位角比基础沥青约小10°,其黏弹性结构中的弹性分量随着粉胶比的增大而迅速提高,并表现出对粉胶比的强烈敏感性。

这种差别说明:基础沥青决定了胶浆的黏弹性结构,如石油沥青的软化点一般在46℃附近,而SBS改性沥青则在65℃以上,试验温度60℃可致使石油沥青接近黏流体态,而SBS改性沥青则仍然处于一个黏弹性态;并随着不同粉胶比矿粉的添加,继续保留这种黏弹性结构特点。

综合可以认为:矿粉对基础沥青起到明显的模量增效行为,如软化点、模量升高;但对石油沥青和SBS改性沥青具有不同的影响特点。高温低频剪切状态下,矿粉基本不改变基质沥青的黏性、弹性组成比例,仅提高其胶浆的模量值;而对改性沥青则在提高模量值的同时,改变胶浆体系的黏、弹性组成,对粉胶比的敏感性强。

2.2 矿粉物理指标的影响

从理论和一些研究结论认为,不同矿粉有着不同的化学组成、颗粒形态,将会对沥青胶浆产生不同的影响^[8-10]。本文采用的矿粉都是经过0.075 mm筛孔的,限于技术手段,笔者尚不能对其中的颗粒组成、化学组成进行详细的表征,仅仅依赖亚甲蓝含量、亲水系数两个指标考察矿粉对胶浆性能的影响关系。从表5中拟合公式的变化斜率上发现,不同产地矿粉对软化点、针入度的变化率是不同的,说明不同物理性质的矿粉对沥青胶浆的性能贡献也是不同的。结合表2矿粉指标,基于相同基础沥青(SL70、SBS),分别考察不同矿粉指标对针入度、软化点曲线斜率的影响关系,趋势见图4、图5。

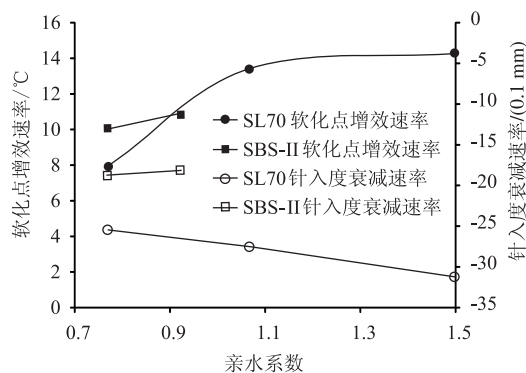


图4 矿粉的亲水系数与胶浆物理特性

Fig. 4 Hydrophilic coefficient of mineral powder and physical property of mortar

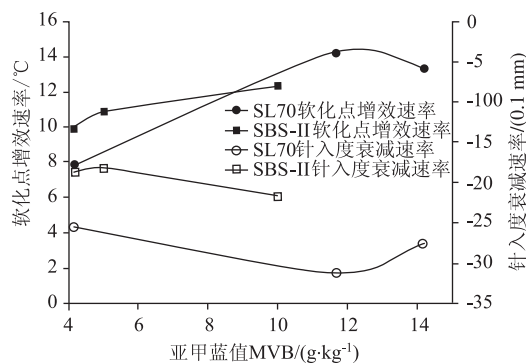


图5 矿粉的亚甲蓝值与胶浆物理特性

Fig. 5 MBV values of mineral powder and physical property of mortar

可以看到,不同矿粉因为不同的亲水系数和黏土含量,会对同一种基础沥青带来不同的软化点增效和针入度衰减行为。随着亲水系数的增加,矿粉亲油性降低,对沥青胶浆的软化点增效速率有所提升,但到亲水系数为1之后,软化点增效基本稳定,不再提供更多的增效效果。从微观原理上讲,应该

是矿粉与沥青的各自游离状态造成,在做软化点试验中容易发生不经蠕变而使加载钢球脱离的现象。但是亲水系数的增加,仍然会加速针入度的衰减速率(绝对值),这个现象与针入度试验自身有关,毕竟针入度试验是矿粉与沥青混合整体,试验取值不会体现出矿粉和沥青的剥离现象^[11]。另外,黏土含量的变化也会带来基本相同的软化点增效、针入度衰减效果,在 MVB 值大于 12 时,软化点增效速率降低。

图 6 为两种石灰岩矿粉对基质沥青胶浆流变指标的影响。可以看到:在同样粉胶比情况下,无论采用基质沥青为 70 号还是 90 号, CQ 矿粉要比 YG 矿粉能够带来更高的模量指标,在 3 种模量指标中均系如此体现。可见,不同产地矿粉对同一种沥青胶浆的作用和效果是有差异的;而且这在矿粉的亲水系数上有所关联, CQ 矿粉亲水系数为 0.769 2, YG 矿粉亲水系数为 0.920 6,前者亲油性相对较高,所以其模量增效更为显著。

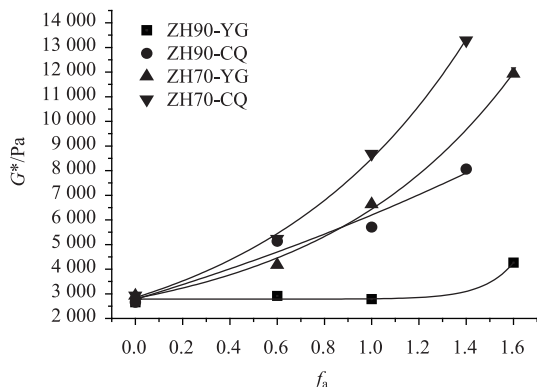


图 6 两种矿粉对胶浆复合模量的影响

Fig. 6 Impact of 2 kinds of mineral powder on complex modulus of mortars

结合可知,沥青胶浆的模量增效行为与矿粉直接相关;在软化点、针入度变化中,基础沥青决定了沥青胶浆的基础性能,矿粉则决定了胶浆性能指标的变化率。当矿粉亲水系数大于 1 时、亚甲蓝值大于 12 后,不再会对沥青胶浆物理指标(稠度、软化点)变化提供更多的改善行为。

2.3 模量增效与改性行为

目前,作为改性剂填料的天然沥青因为其天然的亲油能力和模量增效特点,已经在道路工程中普遍推广^[12-14]。这些天然物质常被粉碎、磨成细粉状,如青川岩沥青粉体多在 200 目以上,即粒度在 0.074 mm 以下,常用在湿法改性沥青工艺中进行使用^[15]。而本文的胶浆试验采用的矿粉粒度也小于

0.075 mm,为考察它对基础沥青软化点的提升效果能否达到相同的改性效果,本文以 ZH70 沥青为基础沥青,对不同天然沥青粉体进行了沥青改性试验检测,着重对其软化点增效速率进行对比。

图 7 为不同产地天然沥青改性沥青的软化点变化曲线。其中,天然沥青的掺量一般都很小,特拉尼达湖沥青 30% 的掺量相当于粉胶比 0.43;但就是这样远小于正常粉胶比情况下,改性沥青软化点也都是随着天然沥青的掺量而线性增长,且增长幅度要比矿粉大得多。图 8 为不同天然沥青和矿粉对基础沥青软化点的增效速率对比,从中看出,两种基础沥青的矿粉胶浆软化点增率在 10 以下,而大部分天然沥青的增率在 20 以上,特别是北美、昌乐、青川岩沥青的增率均在 100 以上,这就说明了矿粉尽管对基础沥青有模量增效的效果,但是相对于天然沥青,仍然称不上改性行为。

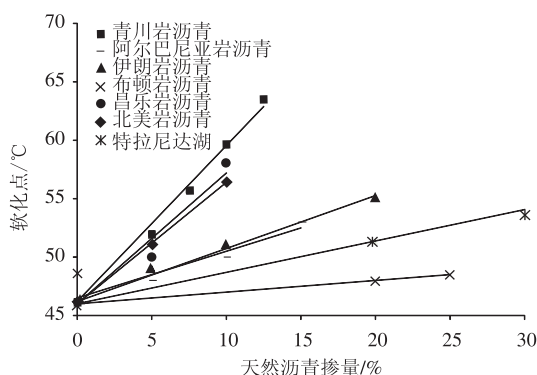


图 7 天然沥青改性沥青软化点变化

Fig. 7 Change of softening points of natural asphalt modified asphalt

若将天然沥青看作一种改性填料,其中含有天然的亲油基因(如长期包裹在油质中的矿物质,具有良好的亲油能力),以及可溶于基础沥青的高软化点沥青质,会与基础沥青形成优良的缔合结构,整体强度均匀,软化点增效更为显著。而矿粉是一种惰性无机物,与基础沥青不相容,紧靠有限的亲油能力与基础沥青混合,从而带来了相对较弱的软化点增效。至于布顿岩沥青之所以和矿粉的增效相当,经检测表明是因为其组成中有机不溶物过多,三氯乙烯不溶物含量在 50% ~ 70% 之间,有效沥青含量少且软化点又过低,才导致与其他天然沥青显著区别的软化点增效。

从这个对比可知:矿粉毕竟是无机物,其无论亲油能力、黏土含量再如何,它对基础沥青的模量增效效果是有限的,也称不上改性效果。这可能就

是以往道路工程研究者仅把矿粉当作填料、忽略沥青胶浆研究的一个原因。

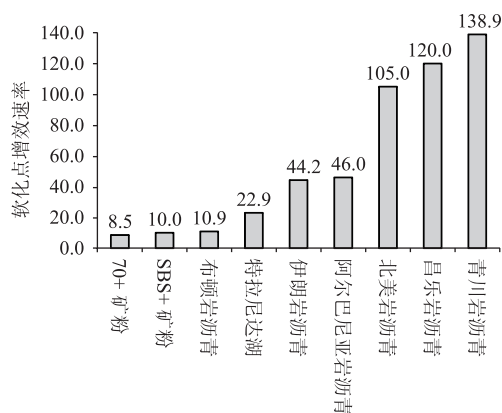


图8 矿粉与天然沥青粉在软化点增效上的对比

Fig. 8 Comparison of softening point increasing effects between mineral powder and natural asphalt powder

3 结论

(1) 矿粉对基础沥青起到明显的模量增效行为, 如软化点、模量升高; 但对石油沥青和 SBS 改性沥青具有不同的影响特点。高温低频剪切状态下, 矿粉基本不改变基质沥青的黏、弹性组成比例, 仅提高其胶浆的模量值; 而对改性沥青则在提高模量值的同时, 改变胶浆体系的黏、弹性组成, 对粉胶比的敏感性强。

(2) 基础沥青的物理性能是在根本上决定着沥青胶浆的性能如何, 但它对物理指标的变化率没有任何贡献。而沥青胶浆的软化点增效行为与矿粉直接相关, 不同矿粉决定了胶浆性能指标不同的变化率。且当矿粉亲水系数大于 1 时或亚甲蓝值大于 12 后, 不再会对沥青胶浆物理指标 (稠度、软化点) 变化提供更多的改善行为。

(3) 矿粉无论亲油能力、黏土含量如何, 它对基础沥青的模量增效效果是有限的, 不会达到天然沥青及其他有机物带来的基础沥青改善效果。

参考文献:

References:

- [1] 李福普, 沈金安. 公路沥青路面施工技术规范实施手册 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
LI Fu-pu, SHEN Jin-an. Enforceable Handbook of Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 樊亮, 宋小金, 申全军, 等. 沥青及胶泥流变特性与

混合料性能的灰关联分析 [J]. 公路, 2009 (11): 169-174.

FAN Liang, SONG Xiao-jin, SHEN Quan-jun, et al. Gray Relation Analysis of Asphalt and Mortar Rheological Property to Mixture Performance [J]. Highway, 2009 (11): 169-174.

- [3] 邹桂莲, 张肖宁, 袁燕. 应用流变学的方法研究填料对沥青胶浆高温性能的影响 [J]. 公路, 2004 (3): 94-97.

ZOU Gui-lian, ZHANG Xiao-ning, YUAN Yan. Study of Effect of Different Fillers on High Temperature Performance of Asphalt Mortar by Rheological Test [J]. Highway, 2004 (3): 94-97.

- [4] 刘丽. 沥青胶浆技术性能及评价方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004.

LIU Li. Study on Technical Performance and Evaluation Methods of Asphalt Mortar [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.

- [5] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S].
JTG F40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].

- [6] JTG E42—2005, 公路工程集料试验规程 [S].
JTG E42—2005, Test Methods of Aggregate for Highway Engineering [S].

- [7] RANDY C W, DONALD E W, PAMELA A, et al. Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-mix Asphalt, NCHRP Report 648 [R]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2010.

- [8] 邵显智, 谭忆秋, 孙立军. 几种矿粉指标与沥青胶浆的关联分析 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (2): 10-13.

SHAO Xian-zhi, TAN Yi-qiu, SUN Li-jun. Analysis on the Relationship between Several Indexes of Mineral Filler and Asphalt Mortar [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (2): 10-13.

- [9] 李涛, 扈惠敏. 矿粉对沥青胶浆性能的影响 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2013, 36 (8): 983-987.

LI Tao, HU Hui-min. Influence of Mineral Fillers on Properties of Asphalt Mortar [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 36 (8): 983-987.

- [10] 李平, 芦军, 张争奇, 等. 沥青混合料用矿粉性能指标研究 [J]. 中国公路学报, 2008, 21 (4): 6-11.

LI Ping, LU Jun, ZHANG Zheng-qi, et al. Research on Performance Index of Mineral Filler Used in Asphalt Mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (4): 6-11. (下转第 35 页)

- [J]. 中外公路, 2007, 27 (6): 164-168.
- ZUO Feng, YE Fen. Evaluation on Technology and Performances of Warm Mix Asphalt Mixture in Foreign Countries [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27 (6): 164-168.
- [2] 秦永春, 黄颂昌, 徐剑, 等. 温拌沥青混合料节能减排效果的测试与分析 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (8): 33-37.
- QIN Yong-chun, HUANG Song-chang, XU Jian, et al. Test and Analysis of Energy Saving and Emission Reduction of Warm Mixed Asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (8): 33-37.
- [3] DING Xin-cheng, DALLAS N, ROBERTL H. et al. Surface Free Energy Measurement of Aggregates and Its Application to Adhesion and Moisture Damage of Asphalt-aggregate Systems [C] //9th Annual Symposium: Aggregates - Concrete, Bases and Fines. Austin, Texas: International Center for Aggregates Research, 2001.
- [4] 魏建明. 沥青、集料的表面自由能及水分在沥青中的扩散研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2008.
- WEI Jian-ming. Study on Diffusion of Surface Free Energy and Moisture of Asphalt and Aggregate in Asphalt [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008.
- [5] FOWKES F M. Dispersion Force Contributions to Surface and Interfacial Tensions, Contact Angles, and Heats of Immersion [J]. Advances in Chemistry, 1964, 43: 99-111.
- [6] OWENS D K, WENDT R C. Estimation of the Surface Free Energy of Polymers [J]. Journey of Applied Polymer Science, 1969, 13 (8): 1741-1747.
- [7] YOUNG T. An Essay on the Cohesion of Fluids [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1805, 95: 65-87.
- [8] 成志强. 基于界面特性的温拌再生沥青混合料水稳性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- CHENG Zhi-qiang. Moisture Stability of Warm Mix Recycled Asphalt Mixture Based on Theory of Interface [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [9] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S].
- JTG E20—2011, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [10] 颜肖慈, 罗明道. 界面化学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- YAN Xiao-ci, LUO Ming-dao. The Interface Chemistry [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [11] 郭平. Sasobit (R) 温拌沥青混合料水稳性能研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2010, 31 (5): 36-39.
- GUO Ping. Study on Water Stability of Sasobit® Warm Mixture Asphalt [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science Edition, 2010, 31 (5): 36-39.
- [12] 孔维川. 集料特性对沥青-集料界面性能影响研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- KONG Wei-chuan. Impact of Aggregate Characteristics on Asphalt-Aggregates Interface Properties [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- ~~~~~
- (上接第30页)
- [11] 樊亮, 林荔萍, 马士杰, 等. 沥青针入度的衍生指标探讨 [J]. 石油沥青, 2010, 21 (1): 53-57.
- FAN Liang, LIN Li-ping, MA Shi-jie, et al. Discussion of Derivation Indicators from Asphalt Penetration [J]. Petroleum Asphalt, 2010, 21 (1): 53-57.
- [12] 樊亮, 王林, 宋小金, 等. 天然沥青组成、类别及在路用工艺中的适用性 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12 (3): 365-368.
- FAN Liang, WANG Lin, SONG Xiao-jin, et al. Composition, Category of Natural Asphalt and Its Technical Applicability in Pavement [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12 (3): 365-368.
- [13] 陆兆峰, 何兆益, 秦旻. 采用天然岩沥青改性的沥青混合料路用性能 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41 (6): 2407-2411.
- LU Zhao-feng, HE Zhao-yi, QIN Min. Pavement Performance of Asphalt Mixture Modified by Rock Asphalt [J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2010, 41 (6): 2407-2411.
- [14] 吕大伟, 莫石秀. 沥青常规评价指标对湖沥青改性沥青的适用性研究 [J]. 公路, 2013 (5): 165-168.
- LÜ Da-wei, MO Shi-xiu. Study of Applicability of Common Performance Evaluation Indexes to Lake Asphalt Modified Asphalt [J]. Highway, 2013 (5): 165-168.
- [15] 宋小金, 何军, 樊亮. 岩沥青改性沥青路面性能研究 [J]. 公路工程, 2012, 37 (4): 96-99.
- SONG Xiao-jin, HE Jun, FAN Liang. Study on Performance of Rock Asphalt Modified Asphalt Pavement [J]. Highway Engineering, 2012, 37 (4): 96-99.