

文章编号:1671-8879(2014)03-0007-10

# 加工工艺关键参数对 SBS 改性沥青性能影响

牛冬瑜<sup>1</sup>, 韩 森<sup>1,2</sup>, 陈 凯<sup>3</sup>, 徐鸥明<sup>1</sup>

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051)

**摘要:**为更合理控制 SBS 改性沥青的质量性能, 选取不同的剪切时间、剪切温度和发育时间, 对 3 种不同的 SBS 改性沥青进行改性加工; 应用沥青试验方法与荧光显微观测技术, 对其感温性、高温性能、低温性能, 以及改性沥青的微观分散状态进行了分析研究。研究表明: 对与沥青相容性较好且相对分子质量较大的 SBS, 加工工艺参数推荐剪切时间 90 min, 剪切温度 180 °C, 发育时间 2 h; 对与沥青相容性较差且相对分子质量较小的 SBS, 加工工艺参数推荐剪切时间 60 min, 剪切温度 170 °C, 发育时间不宜大于 4 h。结合研究结果对现场胶体磨的加工工艺参数进行了优化, 能保证现场生产的 SBS 改性沥青的质量要求。

**关键词:**道路工程; SBS 改性沥青; 工艺参数; 微观形态; 性能

**中图分类号:** U414.11      **文献标志码:** A

## Study on influences of key process parameters on SBS modified asphalt

NIU Dong-yu<sup>1</sup>, HAN Sen<sup>1,2</sup>, CHEN Kai<sup>3</sup>, XU Ou-ming<sup>1</sup>

(1. School of Material Science & Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China)

**Abstract:** To optimize quality functions of SBS modified asphalt, the shear time, the shear temperature and the development time were selected to modify and process three different SBS modified asphalts. The temperature sensitivity, high temperature performance, low temperature performance were analyzed by asphalt experimentation, while the fluorescent optical microscope was used to analyze the micro-disperse state. The results show that some SBS with better compatibility and greater molecular weights were recommended 90 min of shear time, 180 °C of shear temperatures and 2 h of development time, and the others with worse compatibility and smaller molecular weights were recommended 60 min of shear time, 170 °C of shear temperatures and no more than 4 h of development time. According to the research results, the key process parameters of colloid mill are optimized in order to ensure the quality of SBS modified asphalt at site. 9 tabs, 8 figs, 16 refs.

**Key words:** road engineering; SBS modified asphalt; process parameter; micromorphology; performance

收稿日期: 2013-06-06

基金项目: 陕西省交通科技项目(09-01K)

作者简介: 牛冬瑜(1984-), 男, 陕西西安人, 工学博士研究生, E-mail: niudongyu\_1984@163.com.

## 0 引言

在 SBS 改性沥青性质的研究中,除 SBS 改性剂与基质沥青的选择外,其加工工艺是决定改性效果最为重要的因素之一,不同的加工工艺将直接影响到 SBS 改性沥青的各种力学性能、贮存性能及耐老化性能等。目前,中国采用的 SBS 改性沥青的加工工艺以物理方法改性为主,但现行规范规定的 SBS 改性沥青加工工艺关键参数界限值不能完全控制改性沥青的性能,使其性能波动较大,部分质量较差,甚至达不到规范要求<sup>[1-2]</sup>。郝培文等研究了改性工艺参数对 SBS 改性沥青性能的影响,并指出合理的拌和时间与拌和温度可以促使 SBS 与基质沥青均匀混融,并提高其技术性能<sup>[3]</sup>;丛玉凤等也提出了选取合理的剪切温度、剪切时间、剪切机速率,可使改性沥青具有较高的储存稳定性与良好的路用性能<sup>[4]</sup>。但已有研究对 SBS 加工工艺关键参数尚难达成统一共识,且缺乏针对相同改性剂不同基质沥青与相同基质沥青不同改性剂的对比研究,以及对现场 SBS 改性沥青生产工艺参数的优化研究。因此,对 SBS 改性沥青加工工艺关键参数存在的问题进行分析研究,对提高 SBS 改性沥青的改性效果具有重要意义。

实践证明加工工艺中的剪切时间、剪切温度及发育时间都会影响改性沥青的使用性能<sup>[5]</sup>。为研究其变化规律以控制改性沥青的生产,本文通过选取不同的剪切时间、剪切温度和发育时间,对 3 种不同的改性沥青进行沥青改性,应用沥青试验方法与荧光显微观测技术,分析不同改性工艺参数对 SBS 改性沥青的改性效果与沥青使用性能的影响,及对微观分散状态与形态结构的变化影响,以期提出合理的剪切时间、剪切温度和发育时间,并以此为基础,对现场 SBS 改性沥青的生产参数进行优化,使 SBS 改性沥青的性能达到较高的指标要求。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料与加工设备

本文采用的基质沥青为韩国 SK-90<sup>#</sup> 沥青与埃索 ESSO-90<sup>#</sup> 沥青,其技术性能指标见表 1。SBS 改性剂选取常用的改性剂 S-YY、S-YS,(S 代表星型结构),掺入量为 4%,其技术性能指标见表 2,表中 S 为聚苯乙烯链段,B 为聚丁二烯链段。并加入自制稳定剂,剂量为 2.6%。其中,标记制备的改性沥

青 ESSO-90<sup>#</sup> + S-YS 为 E + S-YS; ESSO90<sup>#</sup> + S-YY 为 E + S-YY; SK-90<sup>#</sup> + S-YY 为 S + S-YY。

表 1 基质沥青基本性质试验结果

Tab. 1 Test results of matrix asphalt

指 标	试验结果		规范值
	ESSO-90 <sup>#</sup>	SK-90 <sup>#</sup>	
针入度指数 PI	-1.28	-1.37	-1.5~+1.0
针入度(25 ℃)/0.1 mm	89.3	90.0	80~100
延度(10 ℃)/cm	>100	>100	≥20
软化点/℃	47.5	46.0	≥45
粘度/(Pa·s)	0.363	0.355	
闪点/℃	320.0	311.8	≥245
溶解度/%	99.5	99.5	≥99.5
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.035	1.035	
质量损失/%	0.10	0.13	±0.8
残留延度(10 ℃)/cm	16.0	15.8	≥8
残留针入度比(25 ℃)/%	59.0	60.0	≥57

表 2 SBS 技术性质指标

Tab. 2 Properties of SBS

技术指标	S-YY	S-YS
结构	星型	星型
挥发分/%	≤0.5	≤0.5
嵌段比(S/B)	30/70	30/70
拉伸强度/MPa	12	12
硬度	82±7	80
拉断伸长率/%	600	650
熔体流动速率/(g·(10 min) <sup>-1</sup> )	0~0.1	0.1~0.5

改性剂与基质沥青间的相容性是影响加工工艺和改性效果的关键因素,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052-2000)中 T0661-2011 聚合物改性沥青离析试验,评价改性剂 S-YY、S-YS 与 2 种基质沥青的相容性。评价结果见表 3。

表 3 SBS 改性剂相容性评价

Tab. 3 Evaluation of SBS modifier compatibility

改性沥青	记录	报告	评价结果
E+S-YS	在杯边缘有轻微的聚合物结皮	均匀	改性剂 S-YS 与基质沥青的相容性优于改性剂 S-YY
E+S-YY	均匀的,无结皮和沉淀	边缘轻微结皮	
S+S-YS	在杯边缘有轻微的聚合物结皮	均匀	
S+S-YY	均匀的,无结皮和沉淀	边缘轻微结皮	

采用改性沥青高速剪切仪作为试验加工设备。结合实际情况与已有研究成果,选用合理的高速剪切仪参数指标,见下页表 4<sup>[4-5]</sup>。

表 4 高速剪切仪参数指标

Tab. 4 Parameters of high-speed shearing machine

功率/W	适用温度/℃	剪切速率/( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	处理量/L	工作头直径/mm	工作头浸入液体长度/mm
300	<200	5 000	1.5~2.0	70	260

## 1.2 试验方案

(1)SBS 改性沥青加工工艺分为混溶阶段、高速剪切阶段与发育阶段。选取不同的剪切时间、剪切温度和发育时间作为改性加工的关键控制点。由于剪切时间 2 h 后对改性沥青影响不大,故在剪切阶段分别选取 30、60、90、120 min 为剪切时间;选取 160、170、180、190 ℃为剪切温度;在 120 ℃恒温下的发育阶段,选取 2、4、6、8、10、12、24、48 h 为发育时间。

(2)选取针入度指标 PI、当量软化点  $T_{800}$ 、5 ℃延度与当量脆点  $T_{1.2}$  作为改性沥青的性能评价指标。其中,针入度指标 PI 主要评价道路石油沥青感温性能,PI 越小,表示沥青对温度的变化越敏感,其性能就越不好。通常认为 PI 大于等于 -0.769,性

能为优;-0.769>PI>-2,性能一般;PI 小于等于 -2 时,性能为劣<sup>[6-7]</sup>。当量软化点  $T_{800}$  评价沥青高温性能,其不仅继承了环球法软化点反映沥青高温性能的全部优点,而且克服了蜡对环球软化点的影响, $T_{800}$  值越高,高温性能就越好<sup>[8]</sup>。采用 5 ℃延度与当量脆点  $T_{1.2}$  评价低温性能,其中当量脆点  $T_{1.2}$  指标很好地反映沥青的低温抗裂性,其值越低,表明抗裂性能越好<sup>[9-11]</sup>。

(3)选用荧光显微观测技术对不同剪切时间、剪切温度和发育时间的 E+S-YY 改性沥青试样进行微观形态结构的观察,对 SBS 改性剂在沥青中的分散状态和相容性进行分析研究<sup>[12-13]</sup>。

## 2 剪切时间对 SBS 改性沥青性能的影响

### 2.1 试验结果与分析

在 180 ℃下,剪切后发育 2 h,剪切时间分别为 30、60、90、120 min 时,SBS 改性沥青的技术性能试验结果见表 5。

表 5 不同剪切时间的 SBS 改性沥青性能指标试验结果

Tab. 5 Results of SBS modified asphalt properties with different shear time

项 目	剪切时间/min	不同温度(℃)针入度/0.1 mm			延度(5 ℃)/cm	软化点/℃	运动粘度(135 ℃)/( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	相关系数 R	当量软化点 $T_{800}/\text{℃}$	当量脆点 $T_{1.2}/\text{℃}$	针入度指数 PI	塑性温度范围 $\Delta T$
		15	25	30								
E+S-YS	30	22	64	101	52.0	76.50	1.538	0.998 6	47.36	-16.23	-0.683	63.60
	60	23	66	102	63.5	82.50	1.513	0.997 9	50.30	-17.60	-0.550	64.90
	90	24	64	105	57.3	89.30	1.337	0.999 9	50.67	-15.45	-0.430	66.13
	120	23	67	102	57.1	90.80	1.650	0.997 0	50.10	-14.50	-0.566	64.70
E+S-YY	30	19	52	83	33.2	87.00	2.213	0.999 7	52.90	-13.06	-0.445	65.98
	60	21	55	87	35.2	89.30	2.362	0.999 9	53.30	-15.10	-0.196	68.54
	90	21	57	86	35.3	90.00	2.438	0.997 9	53.20	-15.30	-0.196	68.54
	120	20	53	82	37.3	92.99	2.487	0.999 3	53.89	-14.80	-0.180	68.70
S+S-YY	30	24	57	95	39.9	84.00	2.320	0.998 2	53.68	-17.81	0.084	71.49
	60	24	60	93	48.1	84.20	2.480	0.999 9	53.70	-18.13	0.110	71.58
	90	23	54	81	39.4	91.30	2.700	0.999 8	57.20	-20.10	0.620	77.30
	120	24	53	83	38.9	92.10	3.162	0.999 0	57.70	-21.30	0.772	79.10

#### 2.1.1 感温性

由表 5 可知,3 种不同组合的 SBS 改性沥青,随着剪切时间的增大,感温性逐渐得到改善。E+S-YS,E+S-YY 的 PI,在 30 min 增加至 60 min 阶段,与 S+S-YY 的 PI,在 60 min 增加至 90 min 阶段,分别增长明显,说明其感温性改善效果明显;当使用不同的改性剂对相同的基质沥青进行改性时,不同的剪切时间,其针入度指数变化规律近似,而相同的改性剂对不同的基质沥青进行改性时,不同的剪切

时间其针入度指数变化规律不同;从不同剪切时间对改性沥青感温性的改善效果分析,S+S-YY 在 90 min 时,感温性的改善效果最为明显。

#### 2.1.2 高温稳定性

3 种不同组合的 SBS 改性沥青的  $T_{800}$  随剪切时间的增加而逐渐增大。E+S-YS 在剪切 60 min 后,其  $T_{800}$  值增长缓慢,S+S-YY 在剪切 90 min 后,其  $T_{800}$  的增长变化最明显。因此,应用 S-YS、S-YY 改性剂的改性沥青,剪切时间分别为 60 min 和 90 min

时,其 SBS 改性沥青高温稳定性能最好。

### 2.1.3 低温抗裂性

(1)3 种改性沥青的 5 ℃ 延度随着剪切时间的增加,总体趋势逐渐增大。在 60 min 后,E+S-YS 与 E+S-YY 这 2 种改性沥青的延度变化发生了改变,其中 E+S-YS 延度大幅度下降,而 E+S-YY 延度缓慢上升。说明过度的剪切将 SBS 大分子链断裂成小的碎片,减弱了 SBS 分子的延伸性能,降低了改性沥青的延展性。

(2)3 种改性沥青的  $T_{1.2}$  的值,规律与延度近似,在剪切 60 min 时,E+S-YS 的  $T_{1.2}$  达到了最低值;而在剪切 90 min 时,E+S-YY 与 S+S-YY 达到了最低值。说明 S-YY 的相对分子质量比 S-YS 大,为了达到相同的分散度,S-YY 需要的时间要长。

因此,综合 5 ℃ 延度与当量脆点  $T_{1.2}$  试验结果,S-YS 与 S-YY 改性剂的改性沥青,分别在高速剪切 60 min 与 90 min 时,低温性能改善效果明显。

## 2.2 改性沥青微观形态分析

应用荧光显微镜观测沥青相与 SBS 相的形态特征,图 1 为放大 400 倍的观测结果。其中亮黄色代表 SBS 相,暗黄色代表沥青相。剪切 5 min 时,SBS 零星分散成圆形或椭圆形,面积分布率较小,剪切强度及分散程度不明显;剪切 15~30 min 时,SBS 形状不规则,丝状微粒相联,有形成网络结构的趋势;剪切 45 min 时,SBS 形成大量“毛絮”状结构,且颗粒尺寸有降低的趋势。此结构使沥青相与 SBS 相稳定连接并构筑网状结构。体系中,颗粒尺寸变小,吸油增大,持续下去将趋于稳定的减小过程。

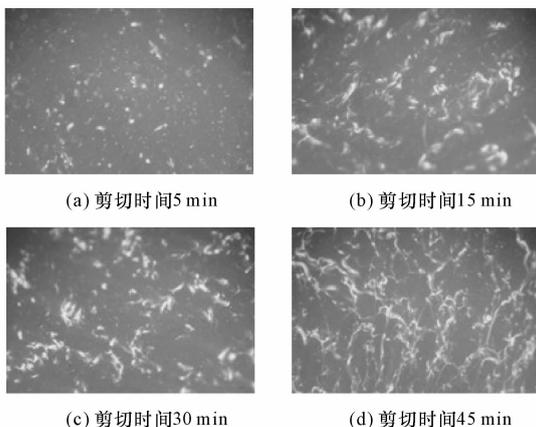


图 1 不同剪切时间的 SBS 改性沥青显微观测(400 倍)

Fig. 1 Microscopic observation of SBS modified asphalt with different shear time (400 times)

用数字图像处理技术进行颗粒量化分析,其结果表明:随剪切时间的延长,SBS 粒径尺寸先增后减。剪切 5 min 时,粒径为 3~5  $\mu\text{m}$ ;剪切 30 min 时,粒径为 8~10  $\mu\text{m}$ ;剪切 45 min 时,粒径为 4~5  $\mu\text{m}$ 。SBS 面积分布率随剪切时间延长逐渐增大,从 4.0% 增大到 17.1%。其中,面积分布率偏小主要是由于改性过程未添加稳定剂以及未经过发育阶段的原因。微观显微镜观测表明,合适的剪切时间会使 SBS 相在沥青中均匀、分散,使改性沥青各项性能得到改善;过长的剪切时间会使 SBS 细粒聚集,改性沥青的各项性能降低<sup>[14]</sup>。

因此,相对分子质量较大的 SBS,推荐剪切时间为 90 min;而相对分子质量较小的 SBS,推荐剪切时间为 60 min。

## 3 剪切温度对 SBS 改性沥青性能的影响

### 3.1 试验结果与分析

对 E+S-YS、E+S-YS、S+S-YY 这 3 种不同的 SBS 改性沥青,在不同剪切温度下,剪切 90 min,发育 2 h 测试改性沥青的技术性能,其试验结果见下页表 6。

#### 3.1.1 感温性

由表 6 可知:随剪切温度的升高,3 种改性沥青的 PI 值变化趋势均为先增大后减小;不同的是,在 170 ℃ 时,E+S-YS 的 PI 值达到了最大值;剪切温度在 180 ℃ 时,E+S-YY 和 S+S-YY 的 PI 值达到了最大值,说明较高的剪切温度有利于改善改性沥青的感温性。比较三者的 PI 值随剪切温度的变化程度,S+S-YY 受剪切温度的影响最为显著,E+S-YY 次之,E+S-YS 影响最小,说明剪切温度对不同改性沥青影响程度不完全一致。E+S-YS 的 PI 在 170 ℃ 后逐渐降低,而 E+S-YY 与 S+S-YY 的 PI 在 180 ℃ 后降低,说明过高的剪切温度对感温性起不到改善效果。

因此,E+S-YS 在剪切温度为 170 ℃ 时,E+S-YY 与 S+S-YY 在剪切温度为 180 ℃ 时,感温性能改善效果最好。

#### 3.1.2 高温稳定性

随着剪切温度的升高,3 种改性沥青的  $T_{800}$  值变化趋势与 PI 值近似,总体变化幅度不大。在 170 ℃ 时,E+S-YS 改性沥青的  $T_{800}$ ,达到最高值后,随着温度的升高,其逐渐降低。同时,在 180 ℃ 时,E+S-YY 与 S+S-YY 改性沥青的  $T_{800}$ ,达到最高值后,

随着温度的升高,其逐渐降低。由此说明,适宜的剪切温度使 SBS 相与沥青相相互作用明显,扩散、溶胀作用的程度增强,形成了稳定的网络结构,最终使

改性沥青的高温稳定性得到改善。因此,E+S-YS 在剪切温度为 170 ℃时,E+S-YY 和 S+S-YY 在剪切温度为 180 ℃时,高温稳定性改善效果最佳。

表 6 不同剪切温度的 SBS 改性沥青性能指标试验结果

Tab. 6 Results of SBS modified asphalt properties with different shear temperatures

项 目	剪切温度/℃	不同温度(℃)针入度/0.1 mm			延度(5 ℃)/cm	软化点/℃	运动粘度(135 ℃)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	R	T <sub>800</sub> /℃	T <sub>1,2</sub> /℃	PI	ΔT
		15	25	30								
E+S-YS	160	24	70	110	44.6	87.3	1.028	0.998 4	49.19	-14.40	-0.680	63.60
	170	22	61	94	52.0	89.3	1.487	0.998 5	51.68	-14.92	-0.384	66.60
	180	23	68	106	48.5	87.8	1.224	0.997 8	49.44	-13.87	-0.710	63.30
	190	20	58	98	58.0	90.2	2.250	0.999 9	49.83	-11.55	-0.909	61.38
E+S-YY	160	21	61	99	25.0	85.7	1.986	0.999 5	49.98	-12.63	-0.780	62.60
	170	20	52	83	34.0	91.2	2.450	0.999 9	53.88	-14.65	-0.196	68.54
	180	21	54	83	35.6	88.8	2.205	0.999 5	54.44	-16.15	0	70.59
	190	19	49	80	34.8	92.2	3.525	0.999 9	54.05	-13.80	-0.259	67.88
S+S-YY	160	22	60	93	32.0	91.3	2.100	0.998 9	52.06	-15.17	-0.322	67.23
	170	23	58	92	35.8	88.2	2.525	1.000 0	53.45	-16.97	-0.016	70.42
	180	25	55	89	33.0	91.4	3.162	0.997 4	56.50	-21.07	0.638	77.57
	190	24	56	92	33.9	90.6	2.912	0.998 4	54.57	-18.58	0.239	73.15

### 3.1.3 低温抗裂性

由表 6 可知:E+S-YS 与 S+S-YY 在剪切温度从 160 ℃升高至 170 ℃时,E+S-YY 在剪切温度从 160 ℃升高至 180 ℃时,其延度的试验结果为逐渐增加,说明适当提高剪切温度,能够增强分子间的热运动,提高 SBS 分散相及微粒之间抵抗外力的能力,使得形变能力增强,延度增加。3 种改性沥青在剪切温度为 180 ℃或 190 ℃时,分别出现延度下降的现象,说明过高的剪切温度易使延度降低,从而影响到低温抗裂性的改善。随着剪切温度的升高,T<sub>1,2</sub>变化趋势为先降低后升高,E+S-YY、S+S-YY 在 180 ℃时,E+S-YS 在 170 ℃时,T<sub>1,2</sub>分别降低至最低值。

因此,选取合适的剪切温度可以改善 SBS 改性沥青的低温性能。

### 3.2 改性沥青微观形态分析

选取 160、170、180、190 ℃这 4 种剪切温度,制备 SBS 改性沥青,并应用荧光显微镜进行取样分析,下页图 2 为放大 400 倍的观测结果。

由图 2 知:不同剪切温度下(发育前),SBS 相与沥青相的微观结构随着剪切温度的提高,SBS 相由不规则的丝状形态逐渐变为粒径很小的规则圆形形态,且其面积分布率也逐渐升高;160 ℃、170 ℃的微观形态,其微粒粒径大小不一,形态大相径庭,不

仅分散不均匀,而且体系中 SBS 溶胀作用也不充分,使得 SBS 相相对独立,相互间作用力较小,对体系的结构性提高不大。在 180 ℃的剪切温度下,SBS 相分散的很均匀,颗粒大小也较为相似,而且相互之间有“毛絮”状结构生成,有机的将相对孤立的 SBS 微粒联系起来,提高体系的结构性,说明此剪切温度较合适。190 ℃剪切温度下的改性沥青体系中分子间作用力强烈,微粒粒径更加细小、面积分布率也增大很多。但经发育后,发现颗粒数量迅速减少,粒径增大,面积分布率也大幅降低,说明体系处于相对不稳定的状态。

对比不同温度发育前后的微观结构图可知:剪切温度为 180 ℃时,SBS 改性沥青经过发育阶段后体系逐渐稳定,微粒继续扩散、溶胀、聚集,而且聚集作用较为明显;SBS 相从原来的相互孤立逐渐形成较为细密的网状结构,增强了体系的结构性,使性能指标得到提升。

因此,相对分子质量较大的 SBS 且与基质沥青相容性较好时,推荐剪切温度为 180 ℃;而相对分子质量较小的 SBS 或者与基质沥青相容性较差时,推荐剪切温度为 170 ℃。

## 4 发育时间对 SBS 改性沥青性能的影响

### 4.1 试验结果与分析

在 180 ℃下,剪切 90 min 后,不同发育时间的

SBS 改性沥青各项技术性能测试结果见表 7。

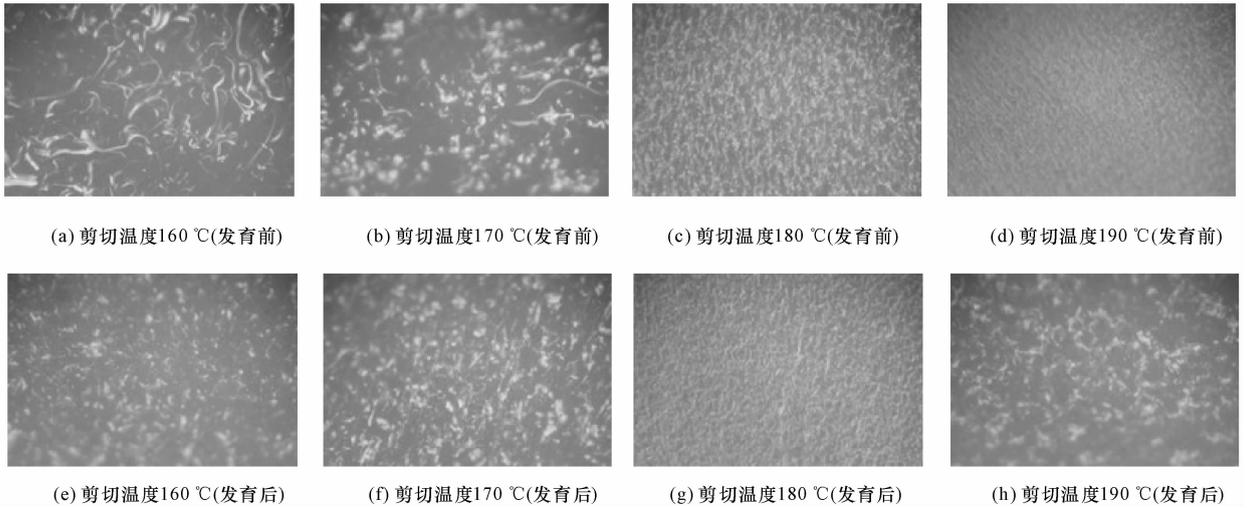


图 2 不同剪切温度的 SBS 改性沥青显微观测照片(400 倍)

Fig. 2 Microscopic observation of SBS modified asphalt with different shear temperatures (400 times)

表 7 不同发育时间的 SBS 改性沥青性能指标试验结果

Tab. 7 Results of SBS modified asphalt properties with different development time

项 目		不同温度(°C)			延度(5 °C)/ cm	软化 点/°C	运动粘度(135 °C)/ (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	R	T <sub>800</sub> /°C	T <sub>1.2</sub> /°C	PI	ΔT
		针入度/0.1 mm										
改性沥青	发育时间/h	15	25	30								
E+S-YS	2	25	61	99	52.0	89.3	1.487	0.999 6	52.97	-18.16	0.05	71.10
	4	23	56	92	37.4	80.6	1.931	0.999 2	53.72	-17.05	0.02	70.77
	6	22	55	88	39.8	79.0	2.037	0.999 9	53.93	-16.48	-0.02	70.42
	8	22	56	92	30.9	78.0	1.788	0.999 8	52.83	-15.54	-0.21	68.38
	10	22	57	93	34.3	73.4	1.900	0.999 9	52.43	-15.28	-0.28	67.71
	12	22	55	94	33.2	70.5	1.875	0.998 4	52.55	-15.17	-0.28	67.72
	24	22	57	96	27.0	65.2	2.037	0.999 5	51.77	-14.67	-0.40	66.44
	48	21	56	96	25.5	68.4	2.828	0.999 4	51.16	-13.31	-0.59	64.47
E+S-YY	2	21	51	74	33.2	92.0	2.125	0.998 3	57.82	-18.91	0.56	76.73
	4	23	55	78	36.3	90.3	2.175	0.997 3	58.03	-21.07	0.77	79.10
	6	23	54	79	31.4	89.1	2.213	0.999 2	57.86	-20.79	0.73	78.66
	8	23	53	81	24.6	88.5	2.225	0.999 9	57.36	-20.21	0.63	77.57
	10	23	53	82	23.0	86.5	2.288	0.999 9	57.04	-19.90	0.58	76.94
	12	23	52	84	24.6	87.5	2.325	0.998 3	56.55	-19.35	0.49	75.91
	24	22	51	85	24.0	88.9	2.338	0.997 5	55.35	-17.42	0.20	72.70
	48	18	50	81	19.3	89.2	2.500	0.999 8	52.65	-11.96	-0.58	64.62
S+S-YY	2	24	56	92	22.9	91.3	2.330	0.998 4	54.57	-18.58	0.24	73.15
	4	26	60	92	48.8	88.5	2.355	0.999 9	55.80	-21.56	0.62	77.36
	6	25	59	90	38.1	90.8	2.290	0.999 9	55.56	-20.54	0.51	76.11
	8	24	55	89	42.0	93.1	2.342	0.998 6	55.49	-19.41	0.40	74.90
	10	26	67	100	40.1	91.1	2.368	0.998 4	52.75	-19.10	0.12	71.85
	12	27	71	105	37.9	90.4	2.532	0.997 5	51.92	-19.20	0.05	71.13
	24	27	65	103	34.2	89.7	2.944	0.999 9	53.05	-19.91	0.22	72.96
	48	26	66	101	34.0	87.1	3.420	0.999 5	52.59	-18.89	0.08	71.49

#### 4.1.1 感温性

由下页图 3 可知:3 种改性沥青针入度指标 PI

在发育前期并不是很稳定,但随着发育时间的增长,均有不同程度的降低趋势;E+S-YY 与 S+S-YY

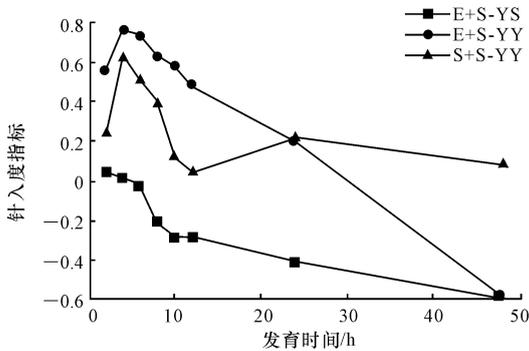


图3 不同发育时间的针入度指标

Fig. 3 Penetration indexes with different development time

从发育 2 h 到 4 h, PI 增长显著,但随着发育时间继续增加,PI 逐渐降低,在发育 48 h 时分别降至最低值;说明发育时间在 4 h 时,E+S-YY 与 S+S-YY 沥青感温性的改善效果最为明显,但随着发育时间的增加,其感温性未得到更进一步改善;E+S-YS 在发育 2 h 时,PI 为最大值,相对感温性能最好,随后其一直处于下降趋势,对感温性没有起到良好的改善效果。

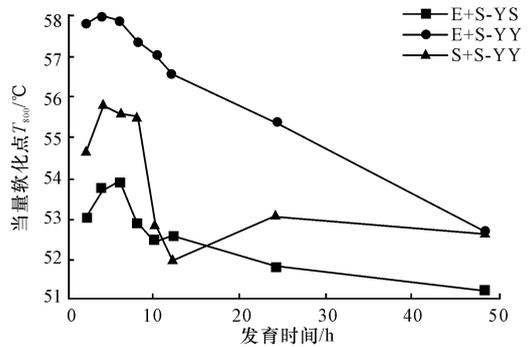
#### 4.1.2 高温稳定性

由图 4 可知,3 种改性沥青随着发育时间的延长, $T_{800}$  均有不同程度的降低;S+S-YY 从 8 h 到 10 h 时,降幅程度最大,说明 SBS 微粒在机械力分散过程中所积累的应力,在分子热运动的过程中得到释放,使得 SBS 之间相互作用力降低,导致稳定性下降,因此应控制发育时间来缓解高温稳定性的降低;E+S-YY 与 S+S-YY 在 4 h 时,达到了  $T_{800}$  的最高值,说明在 4 h 时,这 2 种改性沥青的高温性能得到了改善;E+S-YS 的  $T_{800}$  远低于其他 2 种改性沥青,2 h 后  $T_{800}$  增幅不大,说明 E+S-YS 在发育 2 h 时,高温性能得到了改善。

#### 4.1.3 低温抗裂性

由图 5 可知:随着发育时间变化,3 种改性沥青的  $T_{1,2}$  变化规律截然不同;E+S-YS 的  $T_{1,2}$  在 2 h 时为最小值,随着发育时间的增加  $T_{1,2}$  逐渐增长,涨幅达到 26.7%;E+S-YY 的  $T_{1,2}$  先降低后增长,在 4 h 时后,降到最低值,随后  $T_{1,2}$  大幅增长,涨幅达到 43.2%;S+S-YY 改性沥青的  $T_{1,2}$  总体比前两者较低;在 4 h 后, $T_{1,2}$  降到最低值,随着发育时间的延长,其略有升高,但增长幅度不大。

由图 6 可知:随发育时间的延长,E+S-YS 延度趋势为逐渐降低,其延度由发育 2 h 后的最高值

图4 不同发育时间的当量软化点  $T_{800}$ Fig. 4  $T_{800}$  with different development time

持续减小,表明 E+S-YS 的低温性能在发育初期得到改善;E+S-YY 与 S+S-YY 延度变化规律为先增长后降低,在发育 4 h 后到达峰值,随后逐渐降低,且 S+S-YY 比 E+S-YY 的延度降幅要小。

由 5 °C 延度与当量脆点  $T_{1,2}$  试验结果可知,E+S-YS 在发育 2 h 后,E+S-YY 与 S+S-YY 在发育 4 h 后,其低温性能改善效果比较明显。

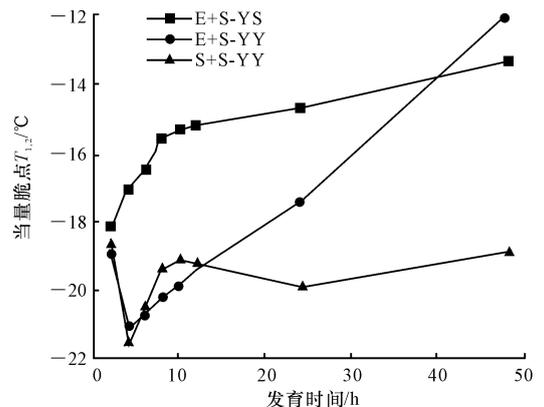
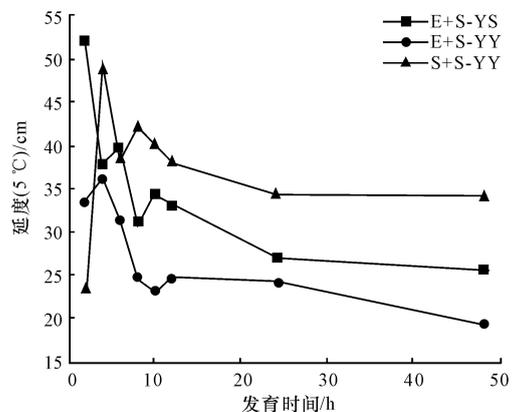
图5 不同发育时间的当量脆点  $T_{1,2}$ Fig. 5  $T_{1,2}$  with different development time

图6 不同发育时间的延度

Fig. 6 Ductilities with different development time

## 4.2 发育时间对改性沥青微观形态分析

分别选取 2、4、6、8、10、12、24、48 h 为发育时间,进行室内试验制备 SBS 改性沥青,并制作用于荧光显微镜观测的试样进行取样分析,图 7 为放大 400 倍的部分观测结果。

由图 7 可知,在发育前期 4 h 时,SBS 粒径逐渐变大,从较为分散的形态转变成不规则的形态。从工艺角度分析,是因为体系中撤销了高速剪切的剪

力场,体系在剪力场储存的能量在发育过程中逐渐释放,使得分散作用降低、聚集作用较为明显。在 12 h 之后溶胀作用下的 SBS 粒径更小,分布更均匀,结构更细密,在荧光显微镜下表现出两相连续结构,并随着发育时间的延长,SBS 相与沥青相之间界面逐渐变的模糊<sup>[15]</sup>。在 48 h 的发育图中已无法分辨出微粒形状与大小,沥青相成为相互独立的“孤岛”结构。

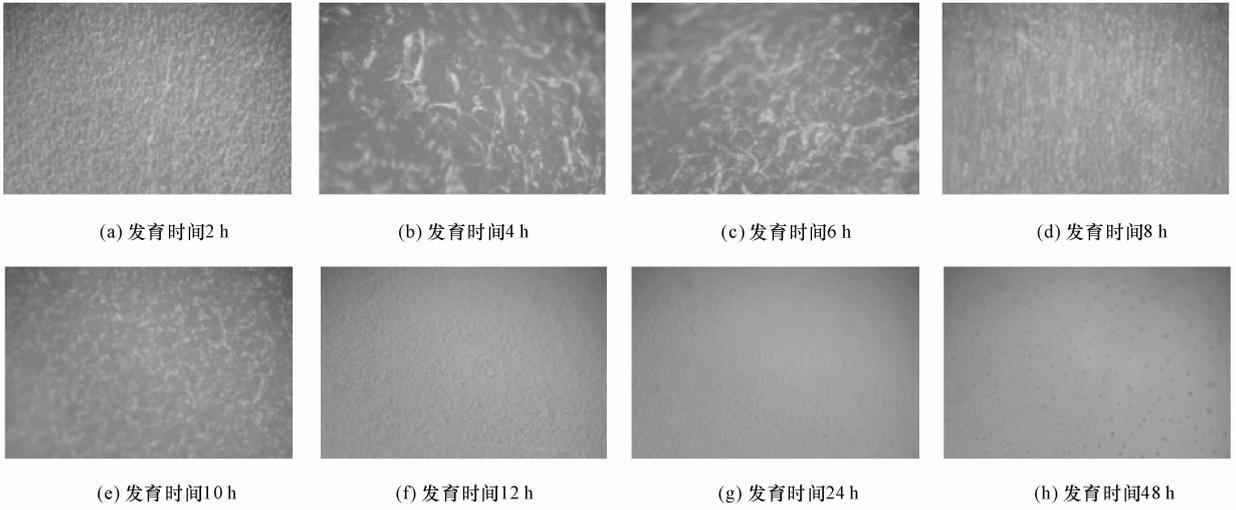


图 7 不同发育时间的 SBS 改性沥青显微观测照片(400 倍)

Fig. 7 Microscopic observation of SBS modified asphalt with different development time

对比不同发育时间的微观结构图可知:发育 4 h, SBS 的充分溶胀,分散状态得到了改善,且形成类似波浪纹的网状结构,增强了 SBS 改性沥青结构性能,可使各性能指标得到提升。

综上所述,针对相对分子质量较小的 SBS,推荐发育时间为 2 h;而相对分子质量较大的 SBS,推荐发育时间不宜大于 4 h。

## 5 现场加工工艺参数优化

结合室内试验研究结果与已有研究成果,确定

表 8 生产工艺参数优化

Tab. 8 Optimization of production process parameters

未优化参数				优化参数			
研磨时间/h	研磨遍数/遍	研磨温度/℃	研磨后发育时间/h	研磨时间/min	研磨遍数/遍	研磨温度/℃	研磨后发育时间/h
≤2	6~8	≤185	≤48	60~65	6	170~180	2

此外,通过荧光显微镜对 2 种现场改性沥青进行了取样分析,见下页图 8。由图 8 可知,对优化后的加工工艺参数胶体磨生产的改性沥青,其 SBS 粒子分布均匀,粒径为 2~10 μm,表明优化后胶体磨生产工艺较好地满足了 SBS 改性沥青生产要求。

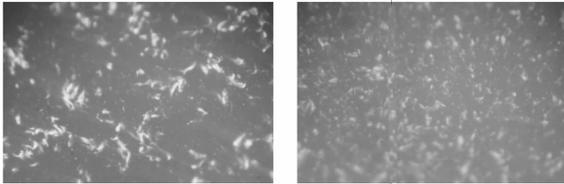
了胶体磨改性沥青生产的优化工艺参数,其优化的工艺参数见表 8<sup>[16]</sup>。应用胶体磨未优化的加工工艺参数与优化后的加工工艺参数,分别进行了西商(西安—商洛)高速公路试验段路面所用 S-YS 与 SK-90# 改性沥青的生产,并对改性沥青指标进行全性能分析,见下页表 9。优化工艺参数后,胶体磨生产的 SBS 改性沥青质量指标均达到和超过了工程设计、施工要求;同时,其各质量指标性能明显优于未优化工艺参数生产的 SBS 改性沥青。

综上可知,优化后的加工工艺参数,不仅对工程中 SBS 改性沥青生产起到了良好的质量保证,而且能提高沥青路面路用性能,延长路面使用寿命,减少早期损坏,并将大大节省维修期的养护费用。

表9 西商高速公路工程SBS改性沥青性能分析结果

Tab. 9 Results of SBS modified asphalt properties for Xishang highway engineering

项目	工程要求	参数未优化结果	参数优化结果	试验方法	
针入度(25℃)/0.1mm	≥50	43	65	T0604-2000	
针入度指数PI	≥-0.2	-0.1	+0.2		
延度(5℃)/cm	≥30	24.8	40.8	T0605-1993	
软化点/℃	≥60	62	71	T0606-2000	
弹性恢复(25℃)/%	≥70	86	90	T0662-2000	
闪点/℃	≥230	>237	>245	T0611-1993	
溶解度/%	≥99	99	99	T0607-1993	
粘度(135℃)/(Pa·s)	≤3	1.45	1.22	T0619-1993	
RTFOT 后	质量损失/%	≤1.0	0.7	0.06	T0609-1993
	针入度比(25℃)/%	≥60	48	84.2	T0604-2000
	延度(5℃)/cm	≥20	20.8	27.9	T0605-1993



(a) 未优化胶体磨生产工艺参数 (b) 优化后胶体磨生产工艺参数

图8 现场改性沥青中SBS分布显微观测照片(400倍)

Fig. 8 Microscopic observation of SBS modified asphalt at field test

## 6 结 语

(1)不同加工工艺参数对不同SBS改性沥青的改性效果差异较大,保持适宜的剪切时间、剪切温度及发育时间,能保证SBS改性剂以一定的细度均匀地分布在沥青中,提高SBS改性沥青的各项性能。

(2)针对相同改性剂不同基质沥青与相同基质沥青不同改性剂,这2种不同组合的改性沥青进行试验对比分析,其结果表明前者的各项性能指标随着加工工艺参数的变化,其变化规律近似相同,而后者的变化规律不完全相同。

(3)荧光显微观测表明,不同的剪切时间、剪切温度、发育时间将直接影响SBS颗粒的细度及分散的均匀性;选取合适的工艺参数能更好地改善SBS颗粒的细度、尺度及分散均匀性,并使改性沥青各项性能得到改善。

(4)对相容性较好和相对分子量较大的SBS,加工工艺参数推荐剪切时间90min,剪切温度为180℃,发育时间不宜大于4h;对于相容性较差和相对分子量较小的SBS,加工工艺参数推荐剪切

时间60min,剪切温度170℃,发育时间2h。

(5)结合室内试验结果,对现场胶体磨的加工工艺参数进行了优化设计,所选用加工工艺参数能使SBS粒子均匀分散为2~10μm,满足SBS改性沥青连续稳定生产的要求,为确保改性沥青质量达到工程设计要求提供了技术保障。

## 参考文献:

### References:

- [1] 袁燕,肖云,张肖宁. SBS改性沥青剪切发育过程的动态力学热分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 29-33.  
YUAN Yan, XIAO Yun, ZHANG Xiao-ning. Dynamic mechanical thermal analysis of shearing and developing process of SBS modified asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 29-33. (in Chinese)
- [2] Wang H N, Huang Z H, Li L, et al. Three-dimensional Modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on x-ray CT microstructure images[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 55-61.
- [3] 郝培文,张宜洛,江建坤,等. 改性工艺参数对SBS改性沥青性能影响研究[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(2): 50-53.  
HAO Pei-wen, ZHANG Yi-luo, JIANG Jian-kun, et al. Study on industrial parameter of SBS polymer-modified asphalt [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, 20(2): 50-53. (in Chinese)
- [4] 丛玉凤,廖克俭,翟玉春. SBS改性沥青生产工艺参数

- 的考察[J]. 石油化工高等学校学报, 2005, 18(2): 32-35.
- CONG Yu-feng, LIAO Ke-jian, ZHAI Yu-chun. Parameter investigation of production process for SBS modified asphalt [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2005, 18(2): 32-35. (in Chinese)
- [5] 韩森, 张彩利, 薛生高, 等. SBS 改性克拉玛依沥青相容性的改善[J]. 公路交通科技, 2004, 21(10): 22-25.
- HAN Sen, ZHANG Cai-li, XUE Sheng-gao, et al. Modification of KLM asphalt by SBS and improvement of their compatibility[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(10): 22-25. (in Chinese)
- [6] 刘树堂, 杨永顺, 房建果, 等. 布敦岩沥青改性沥青混合料试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 351-355.
- LIU Shu-tang, YANG Yong-shun, FANG Jian-guo, et al. Experimental research of bituminous mixtures modified by Buton rock asphalt [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(3): 351-355. (in Chinese)
- [7] Liu S T, Cao W O, Fang J G, et al. Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(7): 2701-2708.
- [8] 张争奇, 崔文社, 马良, 等. SBS 改性沥青软化点试验特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(6): 6-10.
- ZHANG Zheng-qi, CUI Wen-she, MA Liang, et al. Experimental feature of softening point of SBS modified asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(6): 6-10. (in Chinese)
- [9] JTJ 052-2000, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- JTJ 052-2000, Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [10] 原健安. 刍议 SBS 改性沥青的延度性质[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(5): 25-28.
- YUAN Jian-an. A rustics opinion on ductility of SBS modified asphalts[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(5): 25-28. (in Chinese)
- [11] Zhou H P, Holikatti S, Vacura P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 39-48.
- [12] 黄卫东, 孙立军. 聚合物改性沥青显微结构及量化研究[J]. 公路交通科技, 2002, 19(3): 9-11.
- HUANG Wei-dong, SUN Li-jun. Microscopic and quantitative analysis of polymer modified asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(3): 9-11. (in Chinese)
- [13] 黄卫东, 孙立军. SBS 改性沥青的混合原理与过程[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002, 30(2): 189-192.
- HUANG Wei-dong, SUN Li-jun. Mixing principle and procedure of SBS modified asphalt [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(2): 189-192. (in Chinese)
- [14] 肖云, 郑国梁. 基于微观分散性分析的 SBS 改性沥青质量控制[J]. 公路交通科技, 2005, 22(12): 17-19.
- XIAO Yun, ZHENG Guo-liang. Quality control of SBS modified asphalt based on micro-disperse state analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(12): 17-19. (in Chinese)
- [15] 原健安, 周吉萍, 李玉珍. SBS 与沥青的相互作用分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 21-26.
- YUAN Jian-an, ZHOU Ji-ping, LI Yu-zhen. Analysis of interaction between SBS and asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 21-26. (in Chinese)
- [16] 黄婉利, 徐佳富, 徐向阳, 等. 国产 SBS 改性沥青在高速公路上的应用[J]. 石油沥青, 2004, 18(3): 18-22.
- HUANG Wan-li, XU Jia-fu, XU Xiang-yang, et al. Application of domestic SBS modified asphalt in expressway [J]. Petroleum Asphalt, 2004, 18(3): 18-22. (in Chinese)

