

文章编号:1673-5005(2011)05-0146-06

SBS 改性 AH-70 沥青乳化前后性能及微观结构研究

张芹芹, 范维玉, 王铁柱, 南国枝

(中国石油大学 化学工程学院, 山东 青岛 266555)

摘要:采用先改性后乳化的工艺制备苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(SBS)改性乳化沥青,将其蒸发残留物和改性沥青的性能进行对比,并利用荧光显微镜(FM)、傅里叶红外光谱(FT-IR)、核磁共振氢谱($^1\text{H-NMR}$)及差示扫描量热(DSC)等分析手段,评价改性沥青乳化前后的微观结构及热稳定性变化。结果表明:改性沥青乳化后的软化点、5℃延度及弹性恢复率均减小,离析试验软化点差变大,性质衰减后仍较基质沥青有大幅度提高,符合 I-D 级规范要求;改性沥青为两相分散均匀的三维网状结构,乳化后沥青和 SBS 分子之间的交联结构并未发生明显变化,只是有少量 SBS 大颗粒析出、沥青发生轻微老化,热稳定性稍微变差。

关键词:SBS 改性沥青; 乳化; 宏观性质; 微观结构; 热稳定性

中图分类号:TE 626. 86 **文献标志码:**A **doi:**10. 3969/j. issn. 1673-5005. 2011. 05. 028

Study on performance and microstructure of SBS modified asphalt AH-70 before and after emulsification

ZHANG Qin-qin, FAN Wei-yu, WANG Tie-zhu, NAN Guo-zhi

(College of Chemical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: The styrene-butadiene block copolymer (SBS) modified asphalt emulsion was prepared by a modification-emulsification process. The performance of emulsion residue and modified asphalt was analyzed. The microstructure and thermal stability of SBS modified asphalt before and after emulsification were evaluated by means of fluorescence microscope, FT-IR, $^1\text{H-NMR}$ and DSC. The results show that compared with modified asphalt, softening point, 5℃ ductility and elastic recovery of emulsion residue decrease and the difference of top and bottom softening point on separation test becomes large. However, those properties were still improved compared with base asphalt and conformed to I-D standard. SBS modified asphalt exhibits uniform three-dimensional network structure. After emulsification, the cross-linked structure between asphalt and SBS molecules remains unchanged, with a small amount of large SBS particles separating from modified asphalt, minimally aging of asphalt and slight reduction on the thermal stability of modified asphalt.

Key words: SBS modified asphalt; emulsification; macroscopic properties; microstructure; thermal stability

苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(SBS)改性乳化沥青兼具改性沥青和乳化沥青的优点,广泛应用于公路建设和养护工程中。近年来,乳化 SBS 改性沥青研究^[1-2]涉及到改性沥青类型、乳化剂选择以及对设备的要求等方面。实验证明,化学改性沥青比物理改性沥青中 SBS 颗粒细小,一般在 10 μm 以下,更适合于制备改性乳化沥青^[3]。化学改性沥青中,由于沥青与 SBS 分子之间化学接枝以及 SBS 分子之

间化学交联,形成互穿三维网络结构,从而使聚合物 SBS 改性沥青的综合性能更佳^[4-5]。笔者使用自制的 SBS 化学改性沥青制备改性乳化沥青,然后测定改性沥青乳化前后的软化点、针入度、5℃延度、针入度指数等指标,以评价改性沥青乳化前后宏观性能的变化;使用荧光显微镜(FM)、傅里叶红外光谱(FT-IR)、核磁共振氢谱($^1\text{H-NMR}$)及差示扫描量热(DSC)等分析手段对改性沥青乳化前后的微观性能

收稿日期:2011-06-03

基金项目:中国海洋石油总公司 2008 年技术发展项目(KJFYQLY001-2008);山东省自然科学基金资助项目(Y2007B55);中央高校基本科研业务费专项(10CX04023A)

作者简介:张芹芹(1982-),女(汉族),山东济宁人,博士研究生,研究方向为石油与天然气化学。

进行研究,从微观的角度解析宏观性能变化的原因。

1 实验原料和方法

1.1 原料

基质沥青采用齐鲁 AH-70 沥青,基本性质见表

表 1 沥青的基本性质
Table 1 Properties of base asphalt

项目	25 ℃针入度 <i>d</i> /0.1 mm	软化点 <i>T</i> /℃	延度 <i>L</i> /cm			溶解度 (三氯乙烯)/%	25 ℃密度 ρ /(g·cm ⁻³)	四组分 <i>w_F</i> /%			
			5 ℃	10 ℃	15 ℃			饱和分	芳香分	胶质	沥青质
结果	75	46.7	5.8	67	>150	>99	1.029	15.2	47.0	28.2	9.6
标准	GB/T 4509	GB/T 4507	GB/T 4508			GB/T 11148	GB/T 8928	SH/T 0509			

1.2 改性沥青的制备及乳化

改性沥青的制备采用布鲁克 FM-300 Digital 实验室高剪切分散乳化机。制备方法为:将一定量的沥青加热到 170 ℃后加入 3% 的 SBS 和少量的稳定剂,在 170 ~ 180 ℃、3 000 ~ 4 000 r/min 的条件下剪切 1.0 ~ 1.5 h,然后同温下放置在烘箱中继续发育 1 h(同时可赶尽剪切带进的气泡),即制得 SBS 化学改性沥青。

改性乳化沥青使用美国 DALWORTH 胶体磨设备制得。将自制的改性沥青加热至 160 ~ 170 ℃,和预先加热好的乳化剂水溶液一起通过胶体磨,接样以备分析。

改性乳化沥青蒸发残留物采用 JTJ 052-2000 中 T 0651 直接加热法获得。

1.3 改性沥青微观性能评价

红外光谱分析采用美国的 Nicolet IS 10 傅里叶

1. 该沥青饱和分含量少、芳香分和沥青质含量较多。采用线型 SBS 改性剂,嵌段比为 30/70,稳定剂为一种含硫混合物。乳化剂为阳离子慢裂型,采用一种无机物作为乳液稳定剂(为与改性沥青稳定剂区别,以下简称助剂)。

变换红外光谱仪,试样处理采用涂膜法;¹H-NMR 分析采用 BRUKER 公司的 AV-500 型超导核磁共振波谱仪,溶剂为 CDCl₃;DSC 分析采用德国 NETZSCH 的 DSC 204 F1 型差示扫描量热仪,升温速率 10 ℃/min;FM 观测采用的是上海普丹光学仪器有限公司生产的 FM-400C 荧光显微镜,试样放大倍数为 400 倍。

2 结果分析

2.1 改性沥青乳化前后的宏观性质

改性沥青乳化前后的指标测定结果见表 2。由表 2 可知,改性沥青乳化前后的指标均符合规范 JTG F40-2004 对 I-D 级改性沥青的要求。

由表 2 看出:与基质沥青相比,改性沥青的软化点以及 5 ℃延度明显增加,说明沥青经过 SBS 改性后改善了沥青的高温热稳定性和低温抗开裂性能。

表 2 改性沥青的性质

Table 2 Properties of modified asphalts

项目		25℃ 针入度 <i>d</i> /0.1 mm	软化点 <i>T</i> /℃	5 ℃ 延度 <i>L</i> /cm	弹性 恢复/%	离析试验 <i>T</i> _L /℃			四组分 <i>w</i> _F /%			
						上软化点	下软化点	软化点差	饱和分	芳香分	胶质	沥青质
改性沥青	乳化前	55	85.6	31	94	75.7	76.1	0.4	15.5	48.1	25.3	11.1
	乳化后	54	79.7	21	87	66.9	69.4	2.5	15.4	45.3	28.8	10.5
I-D 规范要求		30 ~ 60	≥60	≥20	≥75	—	—	≤2.5	—	—	—	—
标准		GB/T 4509	GB/T 4507	GB/T 4508	SHT 0737	SHT 0740			SHT 0509			

改性乳化沥青蒸发残留物的软化点、5 ℃延度及弹性恢复率分别降低了 6.9%、32.2%、7.4%,离析试验的软化点差变大,造成这些性能变化的因素主要有以下几个方面:①在改性沥青制备完成之后以及进入胶体磨之前一直处于高温储存阶段,根据有关研究^[6],高温(165 ~ 185 ℃)储存时改性沥青中经过溶胀的 SBS 颗粒会从软沥青质中析出而变细,形状也会变得规则,这会使 SBS 颗粒对增加沥青的抗拉伸能力减小,而且三维网状结构也会变得松弛,因而改性沥青的软化点、5 ℃延度以及弹性恢复率

衰减;②在改性乳化沥青蒸发得到残留物的过程中,SBS 与沥青的接枝物以及 SBS 自身的交联产物重新形成新的平衡,在没有剪切分散力的作用下 SBS 具有聚集的趋势,聚集的大颗粒比均匀分散的小颗粒易于挣脱网状结构的束缚而发生离析;③乳化剂和助剂的加入可能也会影响其性质的变化。以上指标虽然发生了衰减,但是相对于基质沥青来说,其性能仍得到了很大提高,而且符合规范 I-D 级要求,所以改性沥青乳化后仍具有较好的性能。

比较改性沥青乳化前后的四组分变化,可知乳

化后饱和分、沥青质含量基本没有变化,芳香分含量减少,胶质含量增加。主要是因为乳化剂和助剂是水溶性物质,在甲苯抽提时以不溶物的形式计算到胶质组分里。

2.2 改性沥青乳化前后的 FM 分析

考察基质沥青及改性沥青乳化前后的荧光显微镜照片可以发现,基质沥青本身不发荧光,在荧光的照射下显示黑色。SBS 在荧光的照射下显示黄色,它在沥青中分布均匀,与沥青之间的相界面模糊^[7],形成了致密的空间网状结构,以致整体显示比沥青颜色浅的深黄色;改性沥青乳化后,有 SBS 大颗粒存在,和乳化前的分散状态相比,大部分 SBS 和沥青之间分散比较均匀,但是 SBS 分子从软沥青质中析出颗粒变细,两相界面更加不明显;少量的 SBS 团聚成较大的颗粒,在图像上颜色明显,和沥青之间的相界面比较清晰。也正是改性沥青中两相分散状态的变化,造成了软化点、延度等指标的衰减以及离析试验软化点差变大。

2.3 改性沥青乳化前后的 FT-IR 分析

图 1 是基质沥青以及乳化前后的改性沥青的红外谱图。为了便于比较,将谱图部分放大,如图 2。

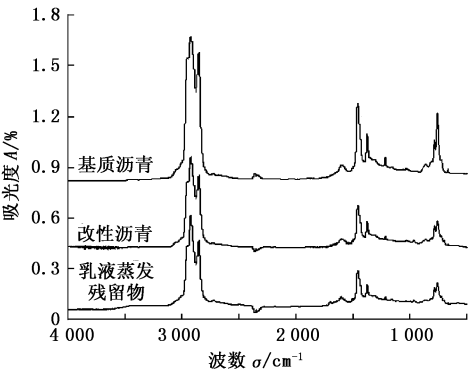


图 1 基质沥青及改性沥青的 IR 谱图

Fig. 1 IR spectra of base asphalt and modified asphalts

可以看出,改性沥青的谱图多了 966 cm^{-1} 和 699 cm^{-1} 两处峰,这是 SBS 的特征峰(图 3)。966 cm^{-1} 对应丁二烯反-1,4 结构^[8]—HC=CH—的 C—H 弯曲振动峰,为聚丁二烯段的特征峰,699 cm^{-1} 对应苯环上单取代 C—H 的弯曲振动峰,为聚苯乙烯段的特征峰^[9]。因 SBS 在改性沥青中含量较少,所以这两个峰在谱图上显示较弱。在 SBS 的谱图上 699 cm^{-1} 处吸收峰的强度明显大于 966 cm^{-1} 处吸收峰的强度,而在改性沥青的谱图上,这两个峰的强度正好相反(强度比见表 3)。699 cm^{-1} 处吸收峰强度的减弱说明主要是聚苯乙烯段参与了化学反应,苯环上

的 α 氢比较活泼,在稳定剂的作用下, α 位易于发生化学反应。而 966 cm^{-1} 处峰的存在说明了只有部分 SBS 参加了化学反应,其余未发生反应的 SBS 被剪切成细小的颗粒分散在致密的网状结构之中,所以改性沥青不易离析,离析试验的上下软化点差只有 0.4 $^{\circ}\text{C}$ 。这种部分 SBS 参加反应对提高沥青的性能反而有利,因为一旦全部 SBS 都参加反应,改性沥青将由于过度交联而丧失沥青的流变特性^[10]。

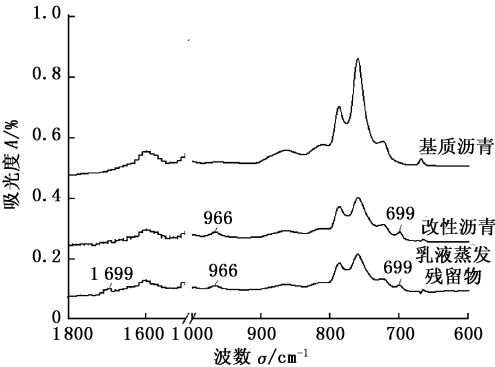


图 2 基质沥青及改性沥青的部分 IR 谱图

Fig. 2 Part of IR spectra of base asphalt and modified asphalts

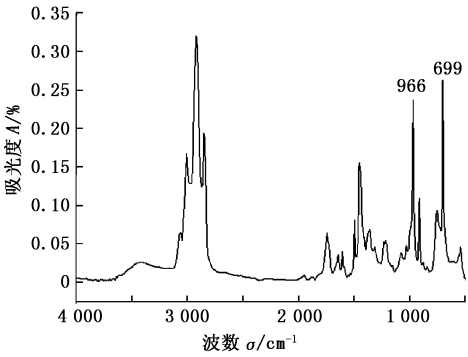


图 3 SBS 的 IR 谱图

Fig. 3 IR spectra of SBS

表 3 SBS 以及改性沥青中丁二烯和苯乙烯特征峰的强度比

Table 3 Intensity ratio of absorption band of butadiene and styrene in SBS and modified asphalts

项目	966 cm^{-1} 积分面积	699 cm^{-1} 积分面积	强度比
乳化前	23.36	11.65	2.01
乳化后	15.48	7.76	1.99

比较改性沥青乳化前后的红外谱图可以看出,各个峰的位置基本没有变化,只是部分峰的强度略有变化。这不仅和取样的多少有关,也和改性沥青中各基团的实际变化有关。

改性沥青乳化前后 SBS 中丁二烯和苯乙烯的含量比,可以表征 SBS 的结构变化,含量比可用其特征吸收峰 966 cm^{-1} 和 699 cm^{-1} 的强度比表示。根

据朗伯-比耳定律,峰的强度比可用峰积分面积的比值得到^[11],使用积分法得到这 2 个峰的面积见表 3。乳化前后这两个峰的强度比差别很小,说明在乳化过程中胶体磨的研磨、剪切作用下,并没有改变改性沥青中 SBS 的结构,即改性沥青中沥青和 SBS 分子之间的交联结构没有发生变化,这也证明了 SBS 大颗粒的存在,只是原来没有发生化学反应的 SBS 颗粒在乳液蒸发残留物的过程中聚集产生的。

基质沥青和改性沥青在 $1\,699\text{ cm}^{-1}$ 处均没有吸收峰,乳化后在此处有较弱的吸收峰,为羰基峰,主要是改性沥青中沥青发生轻微老化的结果^[12]。在温度的作用下沥青分子中活性基团裂解产生自由基,该活性自由基与氧反应进一步转化成氢过氧化物中间体($\text{R}-\text{O}-\text{O}-\text{H}$)。一方面氢过氧化物中间体不稳定分解转化成含羰基官能团的组分,另一方面沥青分子中的双键在氢过氧化物的作用下可以转化成含羰基的官能团。

根据以上分析可知,乳化后改性沥青红外光谱的吸收峰位置基本没有变化,峰强度发生了变化,而且体系中改性沥青的交联结构没有发生变化,只是沥青发生了轻微老化。

2.4 改性沥青乳化前后的¹H-NMR 分析

¹H-NMR 波谱中吸收峰的个数以及化学位移的不同,可以判别质子的类型。各个试样的¹H-NMR 谱见图 4。改性沥青乳化前后的谱图基本上一致,在化学位移 7.271、1.291 和 0.904 附近均有明显的吸收峰,它们分别对应着基质沥青在这几个化学位移附近的吸收峰;在化学位移 2.072 以及 5.436 附近的双峰对应着 SBS 谱图上的吸收峰(化学位移 2.072、5.436 附近的双峰分别对应着苯乙烯段苯环上 α 位氢及丁二烯段双键 α 位氢的吸收峰)。乳化剂在化学位移 0.800 ~ 3.500 之间有多个比较明显的峰,由于其在蒸发残留物中含量较小以及沥青中质子化学位移的影响,在蒸发残留物的谱图上显示不明显。以上分析可知,乳化前后的改性沥青质子的种类并没有发生变化。

为了更进一步地比较乳化前后改性沥青质子的变化,按照常用氢的类型划分方法^[13]计算氢分率,结果见表 4。改性沥青乳化前后的各种氢的分率相差不大,可认为主要由实验误差造成,说明乳化前后改性沥青的结构基本没有发生变化,这和红外分析的结果是一致的。

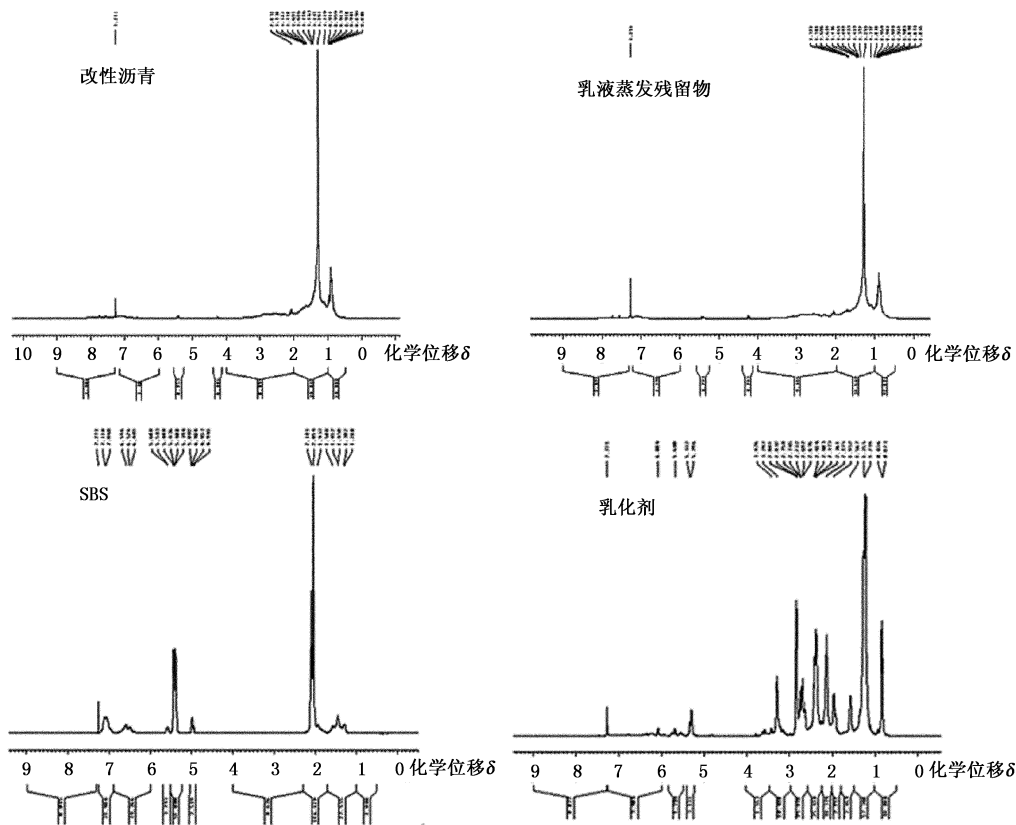


图 4 各个试样的¹H-NMR 波谱图

Fig. 4 ¹H-NMR spectra of each sample

表 4 改性沥青乳化前后的氢分率

Table 4 Hydrogen fraction of modified asphalt before and after emulsion %

类型	乳化前	乳化后
H _a	3.330	3.493
H _α	8.877	9.176
H _β	38.012	34.619
H _γ	10.000	10.000

2.5 改性沥青乳化前后的 DSC 分析

沥青在温度变化过程中热效应可以用 DSC 来测定,通过 DSC 谱图吸收峰的位置和吸热量可以表征沥青中组分发生聚集态的微观变化,以此来评价沥青的热稳定性。一般,吸热峰越高,说明沥青在该温度区间发生变化的组分数量越多;峰越宽,说明发生变化的组分种类越多,沥青也越不稳定,反应在宏观上必然物理性质差别较大。

基质沥青以及改性沥青的 DSC 曲线见图 5,由 DSC 曲线积分得到的各个温度区间的吸热量见表 5。相比基质沥青,SBS 改性沥青峰的位置基本没有变化,各个温度区间组分的吸热量都减少,总吸热量由 5.127 J/g 降至 4.009 J/g,说明沥青改性后温度稳定性得到很大提高。

表 5 基质沥青及改性沥青的吸热量

Table 5 Absorbed heat of base asphalt and modified asphalts

温度区间/℃	吸热量 Q/(J · g ⁻¹)		
	基质沥青	改性沥青	蒸发残留物
-40 ~ 0	1.085	0.473	0.464
0 ~ 50	3.244	2.788	3.218
50 ~ 150	0.798	0.748	0.462

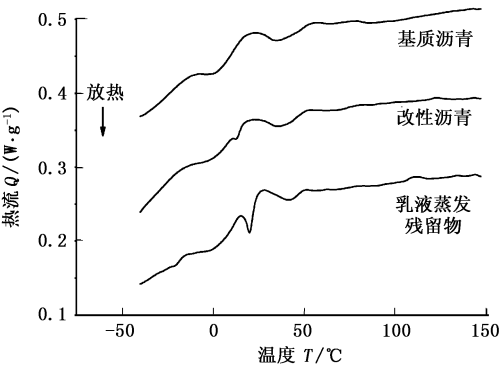


图 5 基质沥青以及改性沥青的 DSC 图

Fig. 5 DSC drawing of base asphalt and modified asphalts

将改性沥青乳化前后的 DSC 曲线进行对比,温度大于 75 ℃时,乳化前后的改性沥青曲线上基本没有明显的峰,说明固态组分已经所剩无几;而在 0 ~ 75 ℃有几个比较明显的峰,说明大部分组分在 75 ℃以下已经完成聚集态的转变,改性沥青表现出黏

流状态。在 0 ~ 50 ℃后者的两个峰分裂稍微明显,吸热量由 2.788 J/g 增加至 3.218 J/g,说明在此温度范围内乳化后改性沥青的稳定性变差。在其他温度范围内后者的峰形都变窄变平缓,吸热量减少。计算后,总吸热量由 4.009 J/g 增加至 4.144 J/g,增加量较少,说明乳化后热稳定性略有下降,而且相对于基质沥青吸热量下降了 19.2%,比基质沥青的热稳定性提高很多。这和离析试验的测定结果是一致的,乳化后其软化点差虽然变大,但仍在规范要求 2.5 ℃之内,因此仍具有较好的应用性能。

3 结 论

(1)改性沥青乳化后宏观性质较乳化前有所衰减,但仍符合规范中对 I-D 级改性沥青的要求。表现为软化点、5 ℃延度以及弹性恢复率降低,离析试验的软化点差变大,其性质衰减后依然较基质沥青有大幅度提高,且符合规范要求,所以仍具有较好的使用性能。

(2)改性沥青为两相分散均匀的三维网状结构,乳化后沥青和 SBS 分子之间的交联结构并未发生明显变化,只是有少量 SBS 大颗粒析出、沥青发生轻微老化,热稳定性稍微变差。

参考文献:

[1] 于翠,王亮,李学峰. SBS 改性乳化沥青的制备与性能分析[J]. 山西建筑,2008,34(1):178-179.
YU Cui, WANG Liang, LI Xue-feng. The preparation of SBS modified emulsified bitumen and its performance analysis[J]. Shanxi Architecture, 2008,34(1):178-179.

[2] 徐幸,程健. 阳离子乳化 SBS 改性沥青的研制[J]. 石油沥青,2009,23(2):26-29.
XU Xing, CHENG Jian. Study on cationic emulsified SBS pavement asphalt[J]. Petroleum Asphalt, 2009,23(2):26-29.

[3] 孙大权,吕伟民. 反应性 SBS 改性沥青的研制[J]. 石油沥青,2002,16(1):30-32.
SUN Da-quan, LÜ Wei-min. Preparation of paving asphalt chemically modified by styrene-butadiene-styrene[J]. Petroleum Asphalt, 2002,16(1):30-32.

[4] 赵仕林,万芳,陈赞,等. 反应性助剂对 SBS 改性沥青的化学改性研究[J]. 公路交通科技,2007,24(7):20-23,43.
ZHAO Shi-lin, WAN Fang, CHEN Zan, et al. Study on chemical modification of SBS modified asphalt with chemical modifier[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007,24(7):20-23,43.

[5] 肖鹏,马爱群. SBS 物理改性沥青与化学改性沥青性

- 能对比研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(9): 10-14.
- XIAO Peng, MA Ai-qun. Comparison research on performance of SBS physically modified asphalt and SBS chemically modified asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(9): 10-14.
- [6] 魏威, 徐春梅. 浅谈 SBS 改性沥青相容性及老化衰减[J]. 山西建筑, 2009, 35(31): 172-173.
- WEI Wei, XU Chun-mei. Initial analysis on compatibility and aging attenuation of SBS modified asphalt[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(31): 172-173.
- [7] 孙大权, 郑晓光, 吕伟民. 沥青-SBS 反应性共混改性[J]. 石油沥青, 2006, 16(2): 6-9.
- SUN Da-quan, ZHENG Xiao-guang, LÜ Wei-min. SBS chemically modified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2006, 16(2): 6-9.
- [8] 朱寒, 吴一弦, 郭青磊, 等. 一种新型丁二烯和苯乙烯嵌段共聚物的结构表征[J]. 北京化工大学学报, 2004, 31(6): 47-51.
- ZHU Han, WU Yi-xian, GUO Qing-lei, et al. Structural characterization of a novel butadiene-styrene block copolymer[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2004, 31(6): 47-51.
- [9] ZORA Vlachovicova, JIRI Stastna, DARYL Mac Leod, et al. Shear deformation and material properties of polymer-modified asphalt [J]. Petroleum & Coal, 2005, 47(3): 38-48.
- [10] 严家俊. 沥青材料性能学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990: 23-27.
- [11] 沈振. 傅里叶红外光谱分析测定尼龙材料中玻纤含量[J]. 中国测试技术, 2004, 30(5): 69-70, 88.
- SHEN Zhen. FTIR analysis measurement the fibre glass content of the nylon material[J]. China Measurement & Testing Technology, 2004, 30(5): 69-70, 88.
- [12] 丰晓, 叶奋, 黄彭. 基于沥青老化的红外光谱羰基吸光度分析[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(3): 375-378.
- FENG Xiao, YE Fen, HUANG Peng. Infrared spectrum analysis of carbonyl absorbance on asphalt aging[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(3): 375-378.
- [13] 肖鹏, 康爱红, 李雪峰. 基于红外光谱的 SBS 改性沥青共混机理[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26(6): 529-532.
- XIAO Peng, KANG Ai-hong, LI Xue-feng. Cross blend mechanism of SBS modified asphalt based on infrared spectra[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2005, 26(6): 529-532.

(编辑 刘为清)

(上接第 145 页)

- [3] 才程, 岳湘安, 赵福麟. 化学剂吞吐与油井堵水结合技术研究[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 70-74.
- CAI Cheng, YUE Xiang-an, ZHAO Fu-lin. A new technique by combining chemicals huff and puff technique with water shutoff in oil well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 70-74.
- [4] 郭立志, 王业飞, 戴彩丽, 等. 探讨两种国产石油磺酸盐间产生协同效应的机理[J]. 石油学报: 石油加工, 2003, 19(6): 46-51.
- GUO Li-zhi, WANG Ye-fei, DAI Cai-li, et al. Mechanism of synergism between two Chinese petroleum sulfonates[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum processing section), 2003, 19(6): 46-51.
- [5] BAE J H., PETRICK CB. Adsorption/retention of petroleum sulfonates in Berea cores[J]. Soc Pe Eng J, 1977, 17(5): 353-357.
- [6] SOMASUNDARAN P, HANNA H S. Adsorption of sulfonates on reservoir rocks[J]. Soc Pet Eng J, 1979, 19(4): 221-232.
- [7] 赵福麟, 王业飞, 戴彩丽, 等. 聚合物驱后提高采收率技术研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 86-89.
- ZHAO Fu-lin, WANG Ye-fei, DAI Cai-li, et al. Techniques of enhanced oil recovery after polymer flooding [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(1): 86-89.
- [8] GALE W W, SANDVIK E I. Tertiary surfactant flooding: petroleum sulfonate composition—efficacy studies [J]. Soc Pet Eng J, 1973, 13(4): 191-199.
- [9] 陈咏梅, 焦丽梅, 李之平, 等. 石油磺酸盐中极性组分的协同效应[J]. 石油学报, 1999, 20(2): 73-77.
- CHEN Yong-mei, JIAO Li-mei, LI Zhi-ping, et al. Synergism effect of polar fractions in petroleum sulfonates [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(2): 73-77.
- [10] 蒋怀远, 饶福焕, 蒋宝源. 驱油用石油磺酸盐成分分析[J]. 油田化学, 1985, 2(1): 75-82.
- JIANG Huai-yuan, RAO Fu-huan, JIANG Bao-yuan. Component analysis of petroleum sulfonates used in surfactant flooding[J]. Oilfield Chemistry, 1985, 2(1): 75-82.
- [11] BREWER P I. The determination of oil-soluble suphonates by two-phase titration[J]. J Inst Pet, 1972, 58: 41-46.
- [12] DUAN Y Z, LI Y, FAN W Y, et al. The effects of di- or polysulfonates on adsorption of petroleum sulfonates[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2009, 30(9): 1324-1332.
- [13] LI Y, DUAN Y Z, ZHANG K. Effect of alkanolamide on interfacial tension and loss of petroleum sulfonates for enhanced oil recovery[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2010, 31(6): 722-726.

(编辑 刘为清)