

文章编号:1671-8879(2015)02-0007-06

## 改性沥青 SBS 含量的红外光谱分析

徐志荣<sup>1,2</sup>, 陈忠达<sup>1</sup>, 常艳婷<sup>1</sup>, 林 杰<sup>1,3</sup>, 陈峙峰<sup>1,4</sup>

(1. 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;  
2. 延安市新区投资开发建设有限公司, 陕西 延安 716000; 3. 晋江市住房和城乡建设局,  
福建 晋江 362200; 4. 河南中州路桥建设有限公司, 河南 周口 466000)

**摘要:**为了准确检测改性沥青中 SBS 改性剂的含量,采用傅里叶变换红外光谱仪对基质沥青、SBS 改性剂和 SBS 改性沥青进行透射光谱分析,根据波数  $966.1\text{ cm}^{-1}$  和  $698\text{ cm}^{-1}$  处出现的特征吸收峰,可定性判别改性沥青中 SBS 改性剂的存在状况,同时根据改性沥青中 SBS 改性剂含量与其波数  $966.1\text{ cm}^{-1}$  处的特征吸收峰的吸光度关系,建立了 SBS 改性剂含量与特征吸收峰处吸光度的线性回归模型,以此来定量分析改性沥青中 SBS 改性剂含量。研究表明:SBS 改性剂含量检测结果与实际 SBS 改性剂掺量基本一致,红外光谱分析法能有效检测改性沥青中 SBS 改性剂的含量,从而实现对 SBS 改性沥青质量的监控。

**关键词:**道路工程;红外光谱;SBS 改性沥青;SBS 含量;最小二乘法;吸光度

**中图分类号:**U415.522 **文献标志码:**A

### Application of infrared spectroscopy to detect the dosage of SBS in modified asphalt

XU Zhi-rong<sup>1,2</sup>, CHEN Zhong-da<sup>1</sup>, CHANG Yan-ting<sup>1</sup>, LIN Jie<sup>1,3</sup>, CHEN Zhi-feng<sup>1,4</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Yanan New City Investment and Development Construction Co. Ltd., Yanan 716000, Shaanxi, China; 3. Jinjiang Housing and Urban Rural Construction Bureau, Jinjiang 362200, Fujian, China; 4. Henan Zhongzhou Road and Bridge Construction Co. Ltd., Zhoukou 466000, Henan, China)

**Abstract:** In order to accurately detect the dosage of SBS modifier in modified asphalt, this paper mainly analyzes the transmittance spectra of matrix asphalt, SBS modifier and modified asphalt with the help of Fourier transform infrared spectroscopy. The condition of SBS modifier in modified asphalt can be identified on the basis of characteristic absorption peaks occurred in the wave numbers of  $966.1\text{ cm}^{-1}$  and  $698.1\text{ cm}^{-1}$ . According to the relationship between the dosage of SBS in modified asphalt and its absorbance of characteristic absorption peak in the wave number of  $966.1\text{ cm}^{-1}$ , a linear regression model between the dosage of SBS and the absorbance of characteristic absorption peak was established. The results show that the detected dosage of SBS and the actual dosage of SBS are basically the same. It shows that the infrared spectroscopy can effectively detect the dosage of SBS in modified asphalt, thus achieving effective monitoring of

收稿日期:2014-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51208047)

作者简介:徐志荣(1976-),男,陕西志丹人,延安市新区投资开发建设有限公司高级工程师,长安大学工学博士研究生,

E-mail: xzhr1976@163.com.

the quality of modified asphalt is also enabled. 2 tabs, 7 figs, 14 refs.

**Key words:** road engineering; infrared spectroscopy; SBS modified asphalt; SBS dosage; least-squares method; absorbance

## 0 引言

在一定的温度和机械剪切、胶体磨作用下将苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(即 SBS 改性剂)均匀分散到基质沥青中形成 SBS 改性沥青。SBS 改性剂的掺入使沥青性质发生改变,SBS 改性剂掺量将直接影响其改善效果,因此加强对改性沥青生产过程中 SBS 改性剂含量(质量含量)的监控尤为重要。目前,改性沥青中 SBS 改性剂含量的确定方法主要有 2 种:一是根据 SBS 改性剂含量与改性沥青的使用性能关系来确定 SBS 改性剂掺量,此类方法需要对改性沥青进行大量的试验,费时费力;二是利用凝胶渗透色谱(GPC)分析方法,建立 SBS 含量与改性沥青的分子量大小 GPC 测定值之间的关系,来确定 SBS 改性剂掺量,该方法虽能实现快速测定,但误差较大<sup>[1-7]</sup>。为此,本文采用傅里叶变换红外光谱仪,通过基质沥青、SBS 改性剂和 SBS 改性沥青透射光谱扫描,分析改性沥青中 SBS 改性剂含量与其特征吸收峰吸光度的关系,探讨应用红外光谱技术检测改性沥青中 SBS 改性剂含量的可靠性。

## 1 红外光谱分析基本原理

将一束连续的红外光照射到物质上,会引起物质的振动-转动能级跳跃,一些特定波长的红外光会被物质吸收,红外光谱就是记录反映不同波长处的吸光度变化的曲线图。由于各种分子都有其特定的组成和结构,这就决定其具有独特的红外吸收光谱,据此可对分子的特征吸收进行结构判别<sup>[8]</sup>。用于研究物质分子的振动-转动光谱是红外光中的中红外区(波长 2.5~25  $\mu\text{m}$ ,波数 4 000~400  $\text{cm}^{-1}$ ),这一区段的光谱可以比较有效地描述化学组成与分子结构的关系,尤其在波数为 600~1 300  $\text{cm}^{-1}$  的区段内不同的物质都有自己的特征吸收峰,据此可作为判别物质的特征指纹,并作为确定其存在的依据。

红外光谱分析法的原理是,通过标准浓度(已知浓度)样品(称其为校正集样品)的红外光谱,以此来建立校正模型,同时通过检测标准浓度范围内的样品(称其为验证集样品),由此来验证校正模型,如果验证集样品的浓度检测结果在允许的误差范围内,则表明所建立的校正模型可用来检测未知浓度的

样品<sup>[8]</sup>。

## 2 SBS 改性沥青改性剂的定性分析

应用红外光谱分析时,应分别测定基质沥青和 SBS 改性剂的红外光谱以及 SBS 改性沥青的红外光谱,根据上述 3 组红外光谱,分析基质沥青和 SBS 改性剂的红外光谱特征,并通过基质沥青和 SBS 改性沥青的对比分析,判别 SBS 改性剂是否存在。

### 2.1 基质沥青红外光谱分析

SK90<sup>#</sup> 基质沥青的红外光谱如图 1 所示。

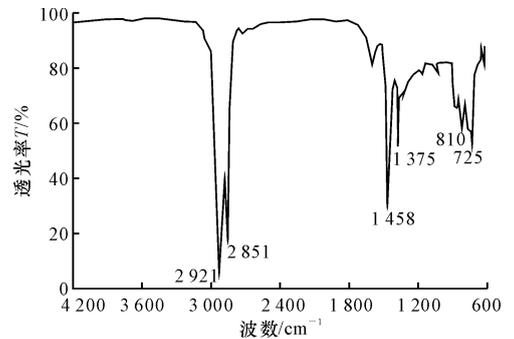


图 1 基质沥青红外光谱

Fig. 1 Infrared spectra of matrix asphalt

由图 1 可见,基质沥青红外光谱图中出现了 3 处吸收峰,其中波数 650~910  $\text{cm}^{-1}$  区域是苯环取代区,出现的几个吸收峰是由苯环上 C—H 面外摇摆振动形成的<sup>[9]</sup>;而波数 1 375  $\text{cm}^{-1}$  和 1 458  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰则由 C—CH<sub>3</sub> 和 —CH<sub>2</sub>— 中 C—H 面内伸缩振动形成的;波数 2 800~3 000  $\text{cm}^{-1}$  范围内的吸收峰比较强,是环烷烃和烷烃的 C—H 伸缩振动的结果,由 —CH<sub>2</sub>— 伸缩振动形成的。

### 2.2 改性剂红外光谱分析

本文采用的 SBS 改性剂的主要质量指标见下页表 1。

SBS 改性剂全波段的红外光谱如下页图 2 所示。由于 SBS 改性剂是由苯乙烯和丁二烯聚合而成,亦即 SBS 改性剂中存在相应的特征官能团,因此其红外光谱图必定与基质沥青的有差异,图 1、图 2 充分说明了这一点。

在 SBS 改性剂红外光谱图中有 2 个较强的吸收峰,其中 698  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰是聚苯乙烯的特征吸收峰,由苯环上 C—H 的面外摇摆振动形成的;

表 1 SBS 改性剂的质量指标

Tab. 1 Quality index of SBS modifier agent

牌 号	结构类型	嵌段比	充油率/%	挥发份/%	灰份/%	300%定伸应力/MPa	拉伸强度/MPa	扯断伸长率/%	扯断永久变形/%	邵氏硬度(A)	熔体流动速率/(g·10 min <sup>-1</sup> )
SBS1301-1 (YH-791H)	线型	30/70	0	≤0.7	≤0.20	≥2.2	≥16.0	≥700	≤40	≥68	0.5~2.5
SBS4303-2 (道改 2 <sup>#</sup> )	星型	40/60	0	≤0.7	≤0.20	≥2.2	≥8.0	≥550	≤40	≥70	0~1.0

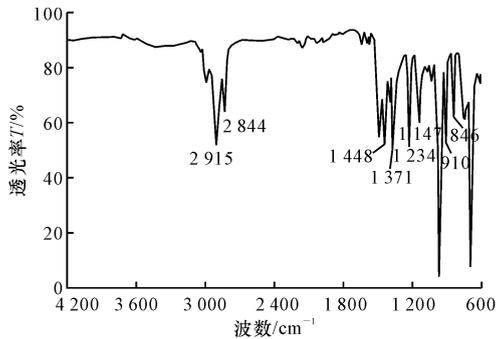


图 2 SBS 改性剂红外光谱

Fig. 2 Infrared spectra of SBS modifier

966.1 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰是聚丁二烯的特征吸收峰<sup>[10]</sup>,并由烯烃两段 C—H 的面外摇摆振动形成的。基于此,可依据改性沥青红外光谱图中 966.1 cm<sup>-1</sup> 和 698 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰来定性判别 SBS 改性剂的存在,并依据吸收峰的强度来定量分析 SBS 改性剂的含量。

### 2.3 SBS 改性沥青红外光谱分析

SBS 改性沥青采用如下的制备工艺。

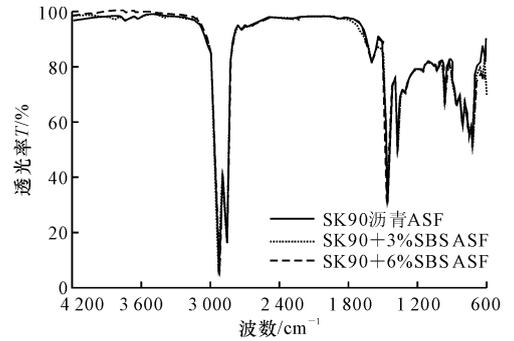
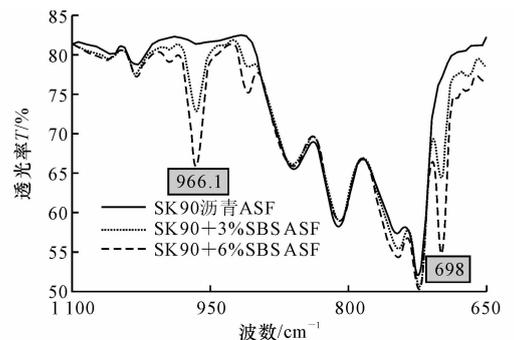
(1)将基质沥青加热到 140 ℃~150 ℃后掺入 SBS 改性剂,采用低速运行的搅拌机对其搅拌 20 min。

(2)将基质沥青和 SBS 改性剂混合物在 170 ℃~190 ℃下,采用 7 000~8 000 r/min 的转速剪切 30 min。

(3)由于在改性沥青的制备过程中会混入大量空气,为防止 SBS 改性沥青放置时间过长而发生离析现象,影响 SBS 改性沥青后续的性能试验,在剪切过的 SBS 改性沥青中掺入适量的稳定剂,并采用低速搅拌器轻轻搅拌 30 min。

(4)将上述制备的改性沥青放入 170 ℃烘箱静置溶胀 1 h,备用。

按上述工艺制备的 SBS 改性沥青的红外光谱图如图 3~图 4、下页图 5 所示。图 3 为 3 种含量(质量含量)的 SBS 改性沥青全波段的红外光谱图(SBS 改性剂的含量分别为 0%、3%和 6%);图 4 为 3 种含量的 SBS 改性沥青 650~1 100 cm<sup>-1</sup>波区的

图 3 3 种 SBS 含量的改性沥青在 600~4 200 cm<sup>-1</sup> 波区的红外光谱Fig. 3 Infrared spectra of 3 kinds of SBS content of modified asphalt in the wave number of 600-4 200 cm<sup>-1</sup>图 4 3 种 SBS 含量的改性沥青在 650~1 100 cm<sup>-1</sup> 波区的红外光谱Fig. 4 Infrared spectra of 3 kinds of SBS content of modified asphalt in the wave number of 650-1 100 cm<sup>-1</sup>

红外光谱图;图 5 为 8 种含量的 SBS 改性沥青在 650~1 100 cm<sup>-1</sup>波区的红外光谱图(SBS 改性剂的含量分别为 0%、3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5%和 6.0%)。

由全波段的红外光谱(图 3)可知,改性沥青与基质沥青在 2 800~3 000 cm<sup>-1</sup>左右出现的强吸收峰带基本相同,吸收峰的位置没有发生变化<sup>[11]</sup>。就改性沥青而言,整个功能团没有发现新的吸收峰,但吸收峰的强度随 SBS 改性剂含量的增大而略有增强。由 650~1 100 cm<sup>-1</sup>波区的红外光谱(图 4、图 5)可知,在指纹区改性沥青与基质沥青的吸收峰存在明显差异,即在波数 690~710 cm<sup>-1</sup>和 950~

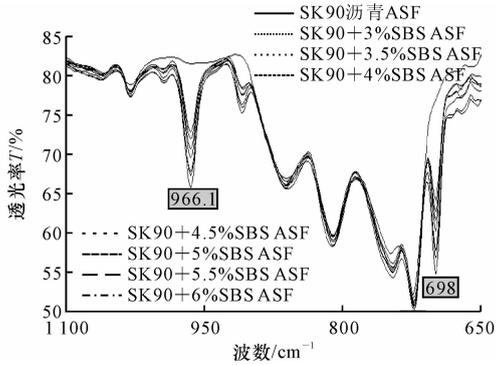


图5 8种SBS含量的改性沥青在650~1100 cm<sup>-1</sup>波区的红外光谱

Fig. 5 Infrared spectra of 8 kinds of SBS content of modified asphalt in the wave number of 650-1100 cm<sup>-1</sup>

980 cm<sup>-1</sup>处,SBS改性沥青的红外波区吸收相对较强,并在966.1 cm<sup>-1</sup>和698 cm<sup>-1</sup>处出现了吸收峰,虽然波数698 cm<sup>-1</sup>的绝对吸收峰值较波数966.1 cm<sup>-1</sup>处的大,但波数966.1 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰特征更为明显。

每种物质分子都有一个由其组成和结构所决定的红外特征吸收峰,它只吸收一些特定波长的红外光<sup>[4]</sup>。由于掺入的SBS改性剂与基质沥青并没有发生化学反应,亦即聚苯乙烯和聚丁二烯并没有发生化学变化<sup>[11]</sup>,所以SBS改性沥青的红外光谱只是在基质沥青的红外光谱上简单叠加了聚苯乙烯与聚丁二烯的红外光谱,而相应的吸收峰位置和强度基本保持不变<sup>[10]</sup>,是基质沥青和SBS改性剂的红外光谱的简单合成图。与基质沥青比较,SBS改性沥青的红外光谱在698 cm<sup>-1</sup>和966.1 cm<sup>-1</sup>处出现了明显的特征吸收峰,分别由SBS改性剂中的聚苯乙烯苯环和聚丁二烯双键等特征官能团形成。

因此,可通过对基质沥青与SBS改性沥青红外光谱图的对比分析,判别改性沥青中是否存在苯乙烯和丁二烯,从而实现对SBS改性剂定性分析。

### 3 SBS改性沥青改性剂的定量分析

在SBS改性沥青的红外光谱中,聚丁二烯吸收峰(即波数966.1 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰)特征比较明显,谱峰强度较易测定,应用也较方便。同时由SBS改性沥青的红外光谱可知,波数966.1 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰的透射率随着SBS改性剂含量的增加而减小。为此,本文依据改性沥青红外光谱图波数966.1 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰强度,对SBS改性剂含量进行定量分析,以此确定SBS改性剂的含量。

### 3.1 定量分析原理

SBS改性沥青改性剂定量分析依据朗伯-比耳(Lambert-Beer)原理<sup>[12]</sup>,即当一束光穿透物质样品时,某一波数( $\nu$ )处的吸收强度与物质样品的浓度和光程长有关,即

$$A(\nu) = \lg\left(\frac{1}{T(\nu)}\right) = a(\nu)bc \quad (1)$$

式中: $A(\nu)$ 为波数 $\nu$ 处的吸收强度(吸光度); $T(\nu)$ 为波数 $\nu$ 处的透光率; $a(\nu)$ 为波数 $\nu$ 处的吸光度系数; $b$ 为光程长(亦即样品厚度,mm); $c$ 为物质样品的浓度(%)。

吸光度 $A$ 常采用谱峰高度表示,也可采用谱峰面积来衡量,由于谱峰高度量测比较方便,故本文采用谱峰高度来表示。

一般红外光穿透深度很小,仅几个微米<sup>[12]</sup>,由于测定不同含量SBS改性沥青的红外光谱分析方法是一样的,红外光穿透沥青样品的深度与反射次数也是一样的,因此在分析吸光度时,可不考虑待测样品光程长对其的影响。由朗伯-比耳原理(式(1))可知,红外光谱中波数966.1 cm<sup>-1</sup>处的吸光度仅与SBS改性剂含量成正比。鉴于此,可以通过测定不同含量的SBS改性沥青中波数966.1 cm<sup>-1</sup>处的吸光度值,利用回归分析法建立SBS改性剂含量与该处吸光度的关系式,即校正模型,以此来确定验证集改性沥青中SBS改性剂的含量。

### 3.2 SBS含量的测定与结果分析

#### 3.2.1 谱峰高度测量

SBS改性剂含量定量分析的基础是量测波数966.1 cm<sup>-1</sup>处的特征吸收峰峰高(其值即为吸光度 $A$ )。为便于量测应对基线进行校正,基线的校正含有人为因素<sup>[12]</sup>,一般以谱峰两侧的拐点为基点,两基点的连线即为校正基线。对于下页图6所示的红外光谱,波数966.1 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰左右两侧分别在波数953 cm<sup>-1</sup>和978.5 cm<sup>-1</sup>处出现拐点,以此为基点,形成基线。经过基线校正,则吸收峰的峰高是指吸收峰顶垂直向下到基线的距离,由专用软件测量。应采用相同的方法采集不同含量SBS改性沥青红外光谱图谱,以便定量分析结果具有可比性。

#### 3.2.2 定量分析模型建立

由于光谱测量会有一些的误差,而且光谱间也存在细微的差异<sup>[13-14]</sup>,但这种误差和差异可通过重复扫描测量来消除,因此本文对每组样品进行10次的扫描测量,根据不同含量的SBS改性沥青标准样品在波数966.1 cm<sup>-1</sup>处吸光度测量值(共进行了3

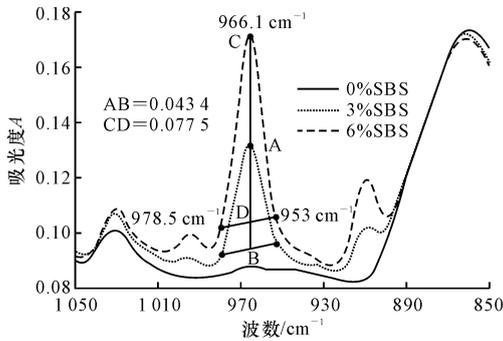


图 6 红外光谱吸收峰峰高的测量方法

Fig. 6 Measurement of high peak of infrared spectra absorption

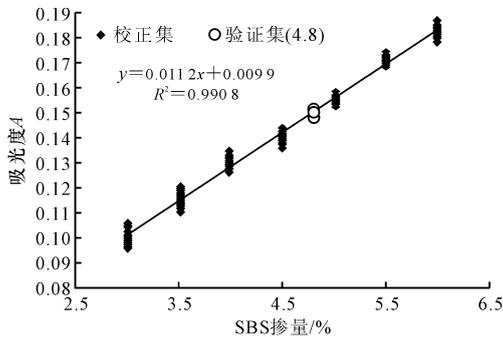
图 7 SBS 含量与波数  $966.1 \text{ cm}^{-1}$  处特征吸收峰吸光度线性校正关系Fig. 7 Linear calibration relationships between SBS content and absorbance of characteristic absorption peak in the wave number of  $966.1 \text{ cm}^{-1}$ 

表 2 最小二乘法校正与验证 SBS 含量

Tab. 2 Least-squares calibration and verification of SBS content

类别	校正样品 ( $y = 0.0112x + 0.0099$ )								验证样品
SBS 含量/%	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	4.8	
测定值/%	范围	2.843~3.080	3.460~3.706	3.941~4.226	4.284~4.555	4.892~5.077	5.417~5.669	5.804~6.112	4.692~4.842
	均值	2.990	3.544	4.083	4.416	4.969	5.555	5.964	4.755
	偏差	0.237	0.246	0.285	0.271	0.185	0.252	0.308	0.150
绝对误差/%	0.010	0.044	0.083	0.084	0.031	0.055	0.036	0.045	

的,说明采用红外光谱分析法确定改性沥青中 SBS 改性剂的含量是可行的,能够实现对 SBS 改性沥青生产过程的质量控制。

## 4 结 语

(1) 基质沥青、SBS 改性剂和 SBS 改性沥青的红外光谱对比分析表明,在波数  $966.1 \text{ cm}^{-1}$  处出现了比较明显的特征吸收峰,其中  $966.1 \text{ cm}^{-1}$  处的特征吸收峰是由 SBS 改性剂中聚丁二烯双键形成的;  $698 \text{ cm}^{-1}$  处的特征吸收峰是由 SBS 改性剂中聚苯乙烯苯环形成的。依据两特征吸收峰可定性判别改性沥青中 SBS 改性剂存在状况。

组扫描,得到对应的 30 个测量值),即可得到 SBS 改性剂含量与其特征吸收峰处吸光度的关系曲线,如图 7 所示。

图 7 显示,SBS 改性剂含量与特征吸收峰处吸光度之间存在显著的线性关系,由此建立回归校正模型,即 SBS 含量的定量分析模型。

$$y(x) = 0.0112x + 0.0099 \quad R^2 = 0.9908 \quad (2)$$

式中: $y$  为吸光率; $x$  为 SBS 掺量; $R^2$  为判定系数。

### 3.2.3 定量测定结果分析

为了检验定量分析模型的可靠性,在相同试验条件下,对校正集样品中 7 种含量的 SBS 改性沥青分别进行 3 组平行测试,测定其吸光度值;同时对含量为 4.8% 的 SBS 改性沥青验证样品进行 3 组平行测试,得到 30 个吸光度测量值,将吸光度测量值分别代入式(2)的定量分析模型进行校正和验证,其均方误差仅为 0.00932,具体分析结果如表 2 所示。

由表 2 可知,4.8% SBS 改性剂含量的验证集样品经校正集校正后,SBS 改性剂含量的测定值为 4.755%,绝对误差仅为 0.045%,测定值与实际含量偏差很小,同时 7 种标准浓度的改性沥青经校正集校正后的测定值与 SBS 改性剂实际掺量亦无明显差异,绝对误差在 0.01%~0.08% 之间。由此表明式(2)的 SBS 改性剂含量定量分析模型是可靠

(2) 由于波数  $966.1 \text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰特征较  $698 \text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰明显,而且谱峰高度(吸光度值)易于测定,所以本文以聚丁二烯中双键的特征吸收峰(即波数  $966.1 \text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰)强度来定量分析改性沥青中 SBS 改性剂含量。

(3) 根据 SBS 改性剂含量与其特征吸收峰处吸光度的关系,采用最小二乘法建立了 SBS 改性剂含量与波数  $966.1 \text{ cm}^{-1}$  处的吸光度的线性回归校正模型,并对其进行了校验。分析结果表明,采用红外光谱技术能准确测定改性沥青中 SBS 改性剂的含量,这为 SBS 改性沥青的质量控制提供了可靠的检测手段,弥补了规范对 SBS 改性沥青质量控制的不

足,值得推广应用。

## 参考文献:

## References:

- [1] Youssef A, Jean N. Fourier transform infra-red spectroscopy characterization of styrene-butadiene-styrene in asphalt binders [D]. Nevada; University of Nevada, 2003.
- [2] 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.
- [3] Wang H N, Huang Z H, Li L, et al. Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 55-61.
- [4] 耿九光, 原建安, 王 乾, 等. 基于 GPC 法的改性沥青 SBS 含量测定方法研究[J]. 应用化工, 2013, 42(9): 1706-1711.  
GENG Jiu-guang, YUAN Jian-an, WANG Qian, et al. The method of SBS content in modified asphalt based on GPC[J]. Applied Chemical Industry, 2013, 42(9): 1706-1711.
- [5] 张伟民, 陈宥之. SBS 改性沥青混凝土路面质量控制[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 273-275.  
ZHANG Wei-min, CHEN You-zhi. Quality control of SBS modified asphalt concrete pavement [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 28(4): 273-275.
- [6] 宋子房. SBS 改性沥青混合料低温性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(8): 76-78, 82.  
SONG Zi-fang. Research on low temperature performance of SBS modified asphalt mixture[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(8): 76-78, 82.
- [7] 殷长燕. SBS 改性沥青生产工艺参数的确定[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(10): 66-68.  
YIN Chang-yan. Determination of parameters for producing process of SBS modified asphalt[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(10): 66-68.
- [8] 刘建学. 实用近红外光谱分析技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
LIU Jian-xue. The utility of near infrared spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [9] 肖 鹏, 康爱红, 李雪峰. 基于红外光谱法的 SBS 改性沥青共混机理[J]. 江苏大学学报, 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, 2005, 26(6): 529-532. (in Chinese)
- [10] 徐惠生. 改性沥青红外光谱分析[J]. 安徽化工, 2007, 33(1): 62-64.  
XU Hui-sheng. The analysis of the infrared spectrum for modified asphalt [J]. Anhui Chemical Industry, 2007, 33(1): 62-64. (in Chinese)
- [11] 肖 鹏. SBS 物理和化学改性沥青及混合料性能评价对比研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.  
XIAO Peng. Evaluation and comparison research on performance of SBS physical and chemical modified asphalts and mixtures[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [12] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱仪[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
WENG Shi-fu. Fourier transform infrared spectroscopy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [13] 董一威, 屠振华, 朱大洲, 等. 利用近红外光谱快速检测牛奶中三聚氰胺的可行性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(11): 2934-2938.  
DONG Yi-wei, TU Zhen-hua, ZHU Da-zhou, et al. Feasibility of using NIR spectroscopy to detect melamine in milk[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(11): 2934-2938. (in Chinese)
- [14] 袁石林, 何 勇, 马天云, 等. 牛奶中三聚氰胺的可见/近红外光谱快速判别分析方法的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(11): 2939-2942. (in Chinese)  
YUAN Shi-lin, HE Yong, MA Tian-yun, et al. Fast determination of melamine content in milk base on vis/ NIR spectroscopy method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(11): 2939-2942. (in Chinese)