

老化SBS改性沥青的结构修复与性能评价

徐光¹,李启石²,旷华平¹,张恒龙^{2,3*},周睿博¹,陈艳梅¹

(1.湖南国信路面环保材料有限责任公司,湖南 株洲 412100;2.湖南大学 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室,湖南 长沙 410082;3.湖南云中再生科技股份有限公司 湖南省建筑固废资源化利用工程技术研究中心,湖南 长沙 410205)

摘要:为恢复老化SBS改性沥青良好的使用性能,该研究使用菜籽油生物沥青(COA)与聚亚甲基多苯基异氰酸酯(PAPI)分别进行沥青组分调节,并修复SBS分子结构。通过对比不同再生组分对短期老化SBS改性沥青物理流变性能及分子量分布的影响,验证上述的双重再生机理。同时,根据未老化基质沥青与SBS改性沥青流变性能在双重再生剂作用下的变化规律,排除再生剂自身对相位角平台区的影响。在综合考虑双重再生SBS改性沥青的物理与流变性能情况下,分别确定COA与PAPI的最佳掺量。试验结果表明:双重再生剂不仅可以调节沥青组分,还能修复SBS分子结构,进而恢复老化SBS改性沥青物理与流变性能。双重再生剂的最佳配比为12% COA+1.25% PAPI;荧光显微镜测试结果进一步验证了PAPI具有重建SBS网络结构的作用。

关键词:SBS改性沥青;沥青组分调节;共聚结构重建;双重再生;物理流变性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

Structural Repair and Performance Evaluation of Aged SBS Modified Asphalt

XU Guang¹, LI Qishi², KUANG Huaping¹, ZHANG Henglong^{2,3*}, ZHOU Ruibo¹, CHEN Yanmei¹

(1. Hunan Guoxin Pavement Environmental Protection Material Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412100, China; 2. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China; 3. Hunan Provincial Engineering Research Center for Construction Solid Wastes Recycling, Hunan Yunzhong Recycling Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205, China)

Abstract: To rejuvenate the excellent performance of aged styrene-butadiene-styrene (SBS) modified asphalt, colza oil bio-asphalt (COA) and polymethylene polyphenyl isocyanate (PAPI) were used in this study for adjusting the asphalt components and repairing SBS molecular structure, respectively. The above-mentioned dual regeneration mechanism was verified by comparing the effects of different rejuvenation components on the physical and rheological properties, as well as the molecular weight distribution of short-term aged SBS modified asphalt. Moreover, according to the change law of rheological properties of unaged base asphalt and SBS modified asphalt under the effect of dual regeneration agent, the influence of the regeneration agent on the phase angle platform area was excluded. Under the comprehensive consideration of the physical and rheological properties of dual regeneration SBS modified asphalt, the optimal contents of COA and PAPI were determined. The experimental results indicate that the double regeneration agent can not only regulate the asphalt components but also connect the SBS molecular structure, restoring the physical and rheological properties of aged SBS modified asphalt. The optimal ratio of the dual regeneration agent is determined to be 12% COA and 1.25% PAPI. In addition, the fluorescence microscopy test results further verify that PAPI can rebuild the SBS network structure.

收稿日期:2024-08-26(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52378449);湖南省杰出青年科学基金资助项目(编号:2024JJ2019)

作者简介:徐光,男,工程师.E-mail:644782991@qq.com

*通信作者:张恒龙,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:hlzhang@hnu.edu.cn

Keywords: SBS modified asphalt; asphalt component adjustment; co-polymer structure reconstruction; dual regeneration; physical and rheological properties

0 引言

苯乙烯—丁二烯—苯乙烯三嵌段共聚物(SBS)在沥青胶结料中形成的三维网络结构使SBS改性沥青拥有优异的高低温性能^[1-2]。然而,在沥青路面铺筑和使用过程中,SBS聚合物受热、氧、紫外线等老化作用会发生共聚物分子链断裂^[3-4],同时沥青基体还会因热氧老化或光氧老化而变硬^[5-6]。这都会导致SBS改性路面性能的严重恶化和使用寿命缩短,最终在路面维修和重建过程中形成大量废沥青混合物^[7]。将废旧SBS改性沥青混合物回收用于路面建设,将大大降低资源消耗和生产成本。

目前,沥青再生技术主要是通过添加富含芳香烃和饱和烃物质来实现沥青组分的平衡,从而恢复老化沥青的物理与流变性能。沥青再生剂可以分为3类:未老化沥青^[8-9]、石油基油^[10-12]和生物油^[13-15]。其中,生物油类物质作为一种可持续绿色再生剂,可以显著改善老化沥青的物理、流变性能和疲劳性能^[16-19]。SBS交联结构对SBS改性沥青及其混合料的性能影响很大,而且SBS聚合物成本占比较大。因此,恢复老化SBS在沥青中的交联结构至关重要。已有研究表明,SBS聚合物的降解产物中存在羟基(—OH)和羧基(—COOH)末端基团,异氰酸酯基和开环后的环氧基可以与氧化丁二烯块的末端基团发生反应,从而将断裂的SBS段重新连接起来^[20-21]。

基于以上分析,本研究采用富含芳香烃和饱和烃的菜籽油生物沥青(COA)调节老化沥青基体组分,使用聚亚甲基多苯基异氰酸酯(PAPI)重建老化共聚物结构。根据复合再生剂对短期老化SBS改性沥青物理与流变性能的再生效果,证明SBS改性沥青整体再生的可行性。根据未老化基质沥青和未老化SBS改性沥青流变性能在复合再生剂作用下的变化规律,排除了再生剂本身对SBS改性沥青相位角平台区的影响。此外,根据再生SBS改性沥青的物理与流变性能确定了复合再生剂的最佳配比。最后,采用荧光显微镜(FM)进一步验证了SBS网络结构得到了有效重建。

1 试验材料与方法

1.1 材料

本研究采用70#基质沥青进行SBS改性沥青的制备,其中基质沥青、SBS改性剂的基本性能见表1、2。COA与PAPI的主要性能见表3、4,外观如图1所示。其中,COA为棕色液体,PAPI为深色黏稠液体。

表1 70#基质沥青基本性能

Table 1 Basic properties of 70# base asphalt

基本性能	单位	测试值
软化点	°C	46.2
延度(15 °C)	mm	>1 500
针入度(25 °C)	0.1 mm	68
黏度(135 °C)	mPa · s	460

表2 SBS聚合物基本性能

Table 2 Basic properties of SBS polymer

基本性能	单位	测试值
结构		线形
嵌段比S/B		30/70
拉伸强度	MPa	17.8
硬度(邵A)		78

表3 COA主要性能

Table 3 Main properties of COA

主要性能	单位	测试值
饱和分	%	33.60
芳香分	%	34.80
胶质	%	18.54
沥青质	%	10.56
不溶甲苯物质	%	2.50
密度	g/cm ³	0.96
pH值		2.10

表4 PAPI主要性能

Table 4 Main properties of PAPI

主要性能	单位	测试值
分子式		[—C ₆ H ₃ (NCO)CH ₂ —] _n
异氰酸酯基	%	34
黏度(25 °C)	mPa · s	210

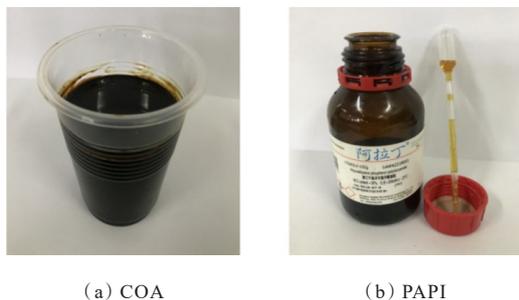


图 1 再生剂外观

Figure 1 Appearance of regeneration agent

1.2 改性沥青的制备与老化

在添加 SBS 改性剂之前,70[#]基质沥青在 175 ℃油浴中被加热至熔融状态。然后,使用高速剪切机在 2 000 r/min 转速下搅动熔融基质沥青,同时将掺量为沥青质量 4% 的 SBS 聚合物缓慢加入沥青中。改性剂添加完毕后,将剪切速率提升至 4 000 r/min,并持续 40 min。最后,为保证 SBS 聚合物的均匀分散以及充分溶胀,使用浆式搅拌器以 2 000 r/min 转速搅拌 SBS 与沥青胶结料,搅拌时间为 2 h,即完成 SBS 改性沥青的制备。

根据 ASTM D1754 和 ASTM D6521 进行薄膜烘箱试验(TFOT)以及压力老化箱试验(PAV),分别模拟 SBS 改性沥青短期和长期老化过程。沥青在 163 ℃下老化 5 h 即可完成短期老化模拟。长期老化模拟则是将短期老化沥青在 100 ℃及 2.1 MPa 条件下老化 20 h。其中,SBS 改性沥青老化前后的物理性能如表 5 所示。

表 5 SBS 改性沥青老化前后物理性能

Table 5 Physical properties of SBS modified asphalt before and after aging

项目	软化点/ ℃	延度 (15 ℃)/mm	针入度 (25 ℃)/ (0.1 mm)	黏度(135 ℃)/ (mPa·s)
未老化	62.3	235	41.6	1 761
TFOT	63.2	175	34.8	1 750
PAV	72.0	0	21.3	2 685

1.3 试验方法

1.3.1 再生方法

SBS 改性沥青双重再生过程主要分为 3 步:第 1 步,使用 150 ℃的油浴锅将老化 SBS 改性沥青加热至熔融状态,然后将 COA 加入其中,同时使用浆式搅拌

器以 750 r/min 转速搅拌 5 min;第 2 步,保持搅拌温度与转速不变,加入 PAPI 继续搅拌 15 min;第 3 步,为使 PAPI 与降解 SBS 充分反应以及避免 SBS 改性沥青因高温而再次老化,将由第 2 步获得的再生 SBS 改性沥青放置在 70 ℃烘箱中保温 1 h。

1.3.2 物理性能测试

为了评价复合再生剂对老化 SBS 改性沥青高低温性能的影响,本研究分别按照 ASTM D113、ASTM D36 和 ASTM D4402 进行 5 ℃延度、软化点及 135 ℃黏度测试。

1.3.3 流变性能测试

根据 ASTM D7175 规范,采用动态剪切流变仪(DSR)进行频率为 10 rad/s 的温度扫描试验。其中,温度扫描范围为 30~90 ℃,应变始终控制在线性黏弹性范围。从流变试验中可获得复数模量 G^* 和相位角 δ 评价指标,以此来表征 SBS 改性沥青再生前后的流变特性。

1.3.4 凝胶渗透色谱(GPC)测试

GPC 曲线可以反映沥青胶结料分子量分布情况,被用于老化 SBS 改性沥青再生前后分子量变化的测定。其中,沥青样品需要采用四氢呋喃溶剂进行溶解,然后将沥青浓度为 3 mg/mL 的溶液以 1 mL/min 速度穿过色谱柱,最终获得测试样品的色谱曲线。

1.3.5 荧光显微镜测试

由于 SBS 分子所形成的交联结构具有荧光效应,在沥青黏结剂黑色背景下,其微观结构可以被清楚显现出来。因此,采用 60 倍物镜双光子共聚焦显微镜对再生前后的 PAV 老化 SBS 改性沥青进行 FM 试验,进一步验证 PAPI 对老化 SBS 结构的修复效果。

2 试验结果与分析

2.1 双重再生效果验证

在道路施工高温环境下,SBS 改性沥青混合料会发生明显的沥青老化及聚合物降解。相比于长期老化 SBS 改性沥青,短期老化 SBS 改性沥青在再生过程中,不同再生剂组分之间的再生效果差异可以更显著地体现在物理和流变性能测试结果上,这将有助于揭示双重再生机理^[22]。同时,长期老化 SBS 改性沥青作为再生对象,不同再生剂组分对其分子量分布的影响可以明显区分。因此,本研究对比了 COA、PAPI 以及 COA 和 PAPI 复合再生剂对 TFOT

老化SBS改性沥青的再生效果,并比较了这些再生剂对PAV老化SBS改性沥青分子量分布的影响。

2.1.1 物理性能

沥青胶结料的热氧老化会导致其低温性能明显降低及高温稳定性提升。因此,再生剂对老化SBS改性沥青低温性能的恢复效果是研究的关键。SBS改性沥青老化前后以及再生TFOT老化SBS改性沥青的低温延展性测试结果如图2所示。

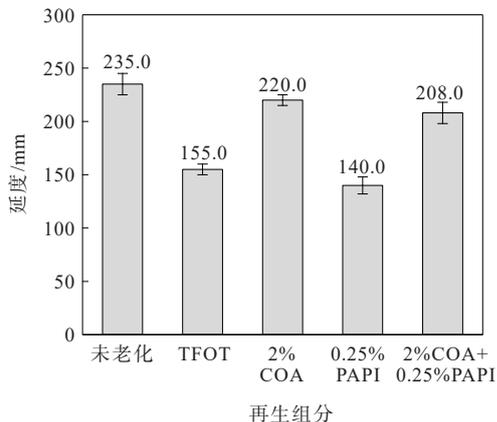
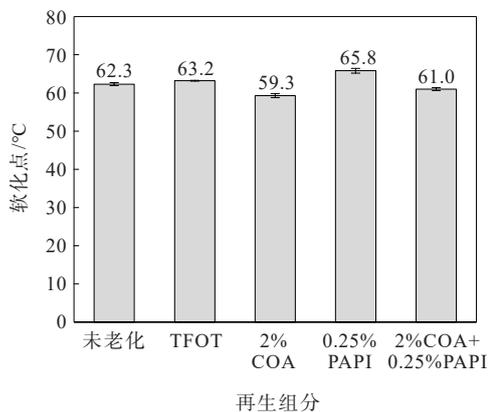


图2 不同再生组分对TFOT老化SBS改性沥青低温延度的影响

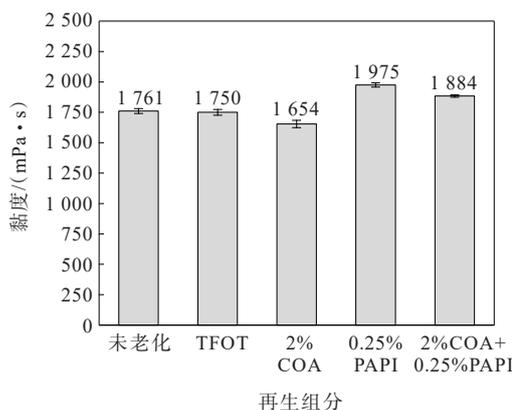
Figure 2 Effect of different regeneration components on low-temperature ductility of TFOT-aged SBS modified asphalt

由图2可知:① 经历TFOT老化之后,SBS改性沥青的5℃延度大幅度下降,这是沥青老化硬度增加及SBS聚合物热降解共同作用导致的;② 在2%COA作用下,TFOT老化SBS改性沥青的延展性得到了明显改善,表明COA可以有效补充老化沥青中的轻组分,恢复其低温性能;③ PAPI的加入,使TFOT老化SBS改性沥青的延度稍微下降,这是因为PAPI在与降解SBS片段发生反应时所生成的氨基甲酸酯基团会增加沥青硬度^[23]。即使SBS网状结构在一定程度上被修复有助于低温延展性的恢复,但官能团的硬化效果会掩盖这种恢复作用。当COA与PAPI一起加入TFOT老化SBS改性沥青时,延度基本提升至未老化状态水平,说明复合再生剂可以实现TFOT老化SBS改性沥青低温性能的有效恢复。

在SBS改性剂形成的三维交联网状作用下,沥青弹性及强度可以得到明显增强,进而展现出高温稳定性的提升。因此,本研究采用软化点及黏度这两个高温性能指标来评价再生剂对老化SBS分子的修复效果。试验结果如图3所示。



(a) 软化点



(b) 黏度

图3 不同再生组分对TFOT老化SBS改性沥青高温性能的影响

Figure 3 Effect of different regeneration components on high temperature performance of TFOT-aged SBS modified asphalt

从图3可以看出:① 经历TFOT老化之后,SBS改性沥青软化点的提升幅度不到1.0℃,同时黏度反而有轻微的下。这是因为热氧老化会增强沥青的高温稳定性,但同时SBS聚合物会发生降解,导致SBS改性剂对沥青软化点的提升作用降低;② 当加入2%COA后,TFOT老化SBS改性沥青软化点及黏度均明显降低,这是因为COA中芳香分和饱和分这两种主要成分重新调节了沥青中的组分比例,使沥青温度敏感性增加及黏性降低;③ PAPI的掺入同时提高了TFOT老化SBS改性沥青的软化点及黏度,这是因为SBS结构重建与氨基甲酸酯基团硬化效果的共同作用。在COA与PAPI的双重再生作用下,TFOT老化SBS改性沥青黏度增加至1884 mPa·s,而软化点下降至61.0℃。由此可见,为让再生SBS改性沥青的高温稳定性与低温抗裂性达到较好平衡,进一步研究工作应包括复合再生剂

最佳配比的确定。

2.1.2 流变性能

SBS改性沥青在一定温度范围内的相位角会出现一段平台区,这是因为SBS共聚物所形成的三维网络结构改变了沥青基体原有流变性能。当SBS聚合物降解程度较深时,相位角平台区会随之消失。因此,采用SBS改性沥青相位角曲线中的平台区来判定再生剂是否能够实现SBS聚合物片段的重建。

图4为不同再生组分对TFOT老化SBS改性沥青流变性能的影响。

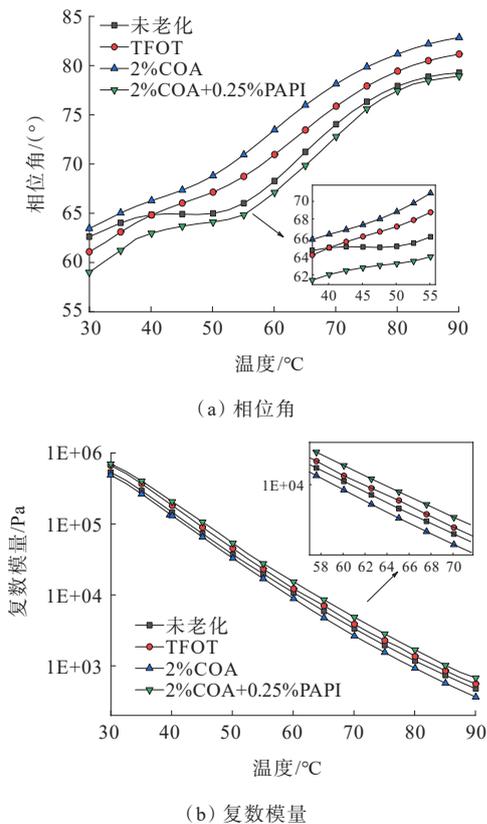


图4 不同再生组分对TFOT老化SBS改性沥青流变性能的影响

Figure 4 Effect of different regeneration components on rheological performance of TFOT-aged SBS modified asphalt

从图4(a)可以看出:①SBS改性沥青经历TFOT老化后,原本明显的相位角平台区消失了,这说明SBS三维网状结构遭到较为严重的破坏;②掺入2%COA后,TFOT老化SBS改性沥青相位角曲线形状并未发生明显的变化,而是相位角整体变大,这因为COA增加了软沥青质的占比,进而提升了TFOT老化SBS改性沥青的黏性比例;③当PAPI加入COA再生SBS改性沥青时,再生沥青出现了明

显的相位角平台区,且其相位角曲线与未老化SBS改性沥青相位角曲线靠近,这表明PAPI可以进行老化SBS分子的修复,恢复老化SBS改性沥青的黏弹特性。从图4(b)可以看出:①COA的软化作用降低了TFOT老化SBS改性沥青的复数模量;②PAPI展现出相反的效果,这是由于降解SBS分子重建与氨基甲酸酯基团硬化效果的共同作用使COA再生沥青硬度增加导致的。

2.2 再生剂对相位角平台区的影响

为排除复合再生剂自身对沥青相位角平台区的影响,本研究分别探究了未老化基质沥青与未老化SBS改性沥青流变性能在复合再生剂作用下的变化规律(图5)。

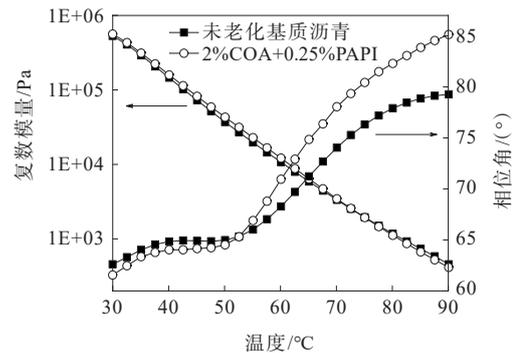


图5 复合再生剂对未老化基质沥青流变性能的影响
Figure 5 Effect of compound regeneration agent on rheological properties of unaged base asphalt

由图5可知:COA与PAPI的加入并未使基质沥青相位角曲线出现平台区,这表明复合再生剂不会改变基质沥青原有流变特性。同时,基质沥青的复数模量在COA与PAPI作用下基本保持不变,这说明PAPI也会对沥青起到一定的硬化作用,从而抵消COA对基质沥青刚度的降低效果。

未老化SBS改性沥青在添加复合再生剂前后的流变性能如图6所示。

由图6可知:在COA与PAPI复合作用下,未老化SBS改性沥青的相位角平台区没有发育或扩大,这进一步说明复合再生剂与未老化SBS改性沥青不发生反应,其本身不会对相位角平台区产生影响。此外,与基质沥青性能变化规律一致,未老化SBS改性沥青的复数模量在复合再生剂的作用下没有发生明显变化。

2.3 再生剂对分子量分布的影响

沥青样品的GPC曲线如图7所示。

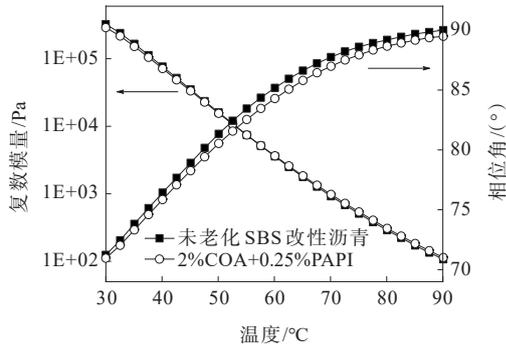


图6 复合再生剂对未老化SBS改性沥青流变性能的影响
Figure 6 Effect of compound regeneration agent on rheological properties of unaged SBS modified asphalt

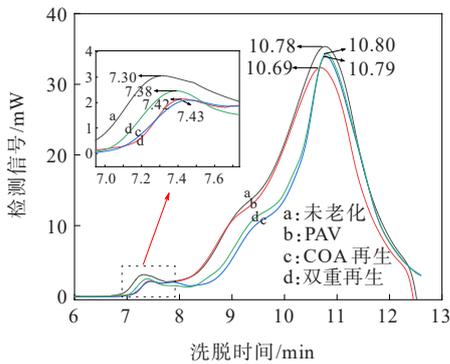


图7 沥青样品的GPC曲线
Figure 7 GPC curves of asphalt samples

由图7可知:曲线在6~8 min和8~12 min洗脱时间出现了明显的峰。按照分子量越大分子越早被洗脱的原理,右峰代表分子量明显较小的沥青分子,左峰代表分子量通常在万以上的SBS共聚物分子。SBS改性沥青经历PAV老化之后,代表沥青分子的曲线峰值从10.78移动到10.69,这说明老化过程中由于氧化缩合的原因,沥青分子量逐渐变大。在COA或者COA/PAPI复合再生剂的作用下,PAV老化SBS改性沥青的右峰峰值接近于未老化SBS改性沥青,这表明COA能够平衡老化沥青的分子量分布。对于代表SBS聚合物的曲线峰,SBS改性沥青在PAV老化后,峰值从7.30增加到7.42,说明SBS在老化过程中被降解,导致分子量下降。此外,COA的加入对峰值与峰形的影响都很小,这是因为COA没有重建老化SBS结构的效果。使用COA/PAPI再生SBS改性沥青后,曲线峰值从7.42移动至7.38,且检测信号明显增强,这表明PAPI可以成功连接部分降解SBS分子,SBS分子量得到提高。

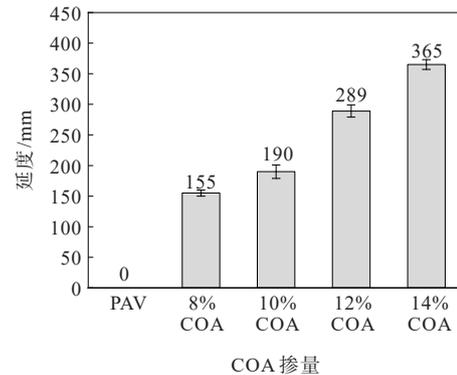
2.4 双重再生剂最佳掺量的确定

以上研究结果表明:双重再生方法不仅可以平

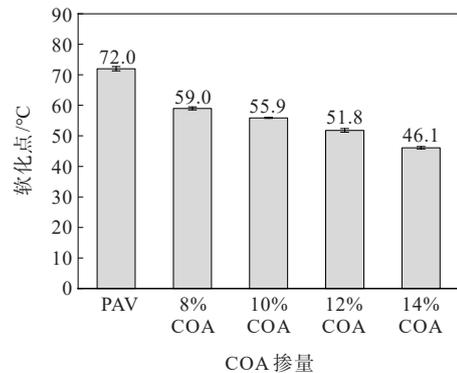
衡老化沥青组分还能重建已降解SBS分子,进而实现老化SBS改性沥青的有效再生,这相比于单一再生方法具有明显的优势。因此,进一步确定COA与PAPI之间的最佳配比尤为重要。本研究主要通过控制单一变量的方式分别确定再生剂各组分最佳掺量,这样可以探究老化SBS改性沥青性能随再生剂掺量的变化规律。由于SBS改性沥青低温延度在经历PAV老化后基本丧失,若直接添加具有一定硬化效果的PAPI将难以体现其对老化SBS改性沥青低温性能的影响。同时,SBS网络结构的形成需要经历轻组分吸收和溶胀过程^[22],恰好COA可以提供一定轻组分。因此,先采用COA对PAV老化SBS改性沥青进行再生,再研究PAPI对COA再生SBS改性沥青的影响。

2.4.1 COA最佳掺量

PAV老化SBS改性沥青在不同COA掺量下的延度及软化点如图8所示。



(a) 延度



(b) 软化点

图8 不同COA掺量下PAV老化SBS改性沥青的物理性能
Figure 8 Physical performance of PAV-aged SBS modified asphalt with different COA contents

从图8可以看出:COA的加入可以有效提升PAV老化SBS改性沥青低温延度,但会明显降低其

软化点。当掺量由10%增加到12%时,COA再生SBS改性沥青5℃延度从190 mm增加至289 mm,满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)(以下称规范)中I-D级SBS改性沥青5℃延度大于200 mm的要求。因此,COA掺量应不小于12%。同时,在8%COA作用下,PAV老化SBS改性沥青软化点为59℃,这不符合I-D级SBS改性沥青软化点大于60℃的性能要求。而且,当掺量达到14%时,COA再生SBS改性沥青软化点低于50℃。由此可见,单独使用COA的再生方式,难以让再生SBS改性沥青高低温性能同时达到规范的使用要求。最后,综合考虑再生SBS改性沥青的高低温稳定性以及SBS结构修复和氨基甲酸酯基团对沥青高温性能具有一定提升作用,将COA的最佳掺量初步设定为12%。

2.4.2 PAPI最佳掺量

为确定PAPI的最佳掺量,本研究分别测试了12%COA再生SBS改性沥青在不同PAPI掺量下的物理及流变性能(图9、10)。

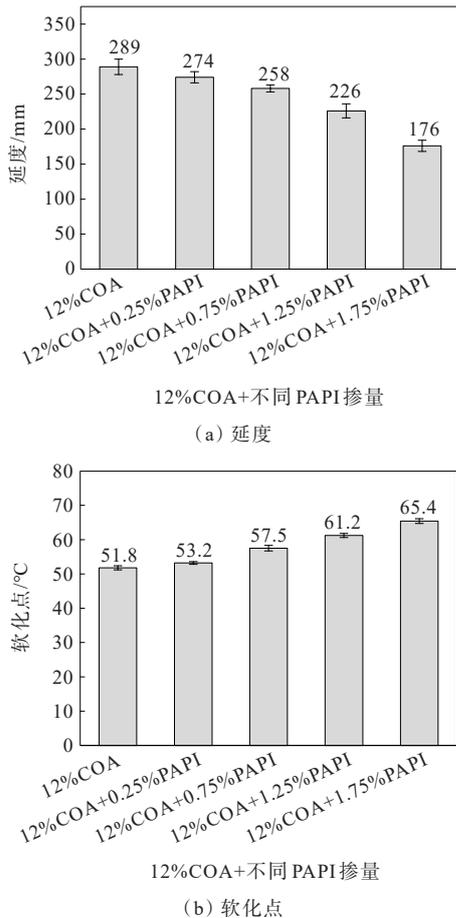


图9 不同PAPI掺量下双重再生SBS改性沥青的物理性能
Figure 9 Physical performance of dual regeneration SBS modified asphalt with different PAPI contents

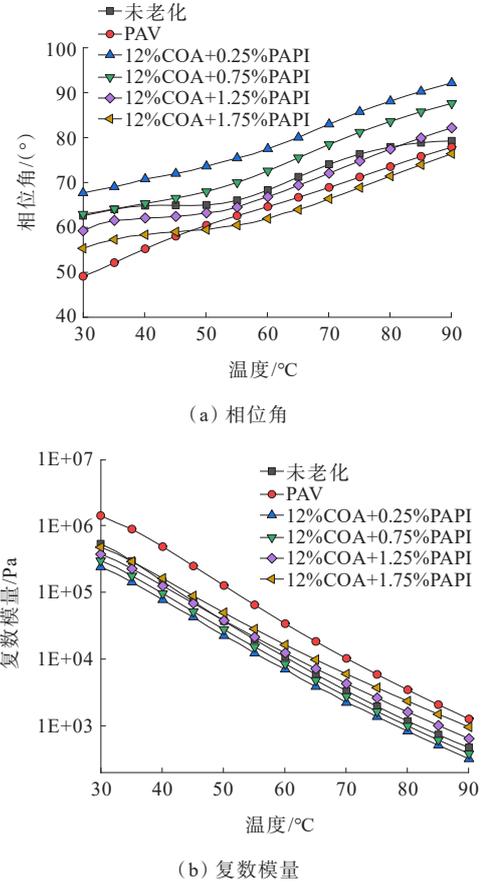


图10 不同PAPI掺量下双重再生SBS改性沥青的流变性能
Figure 10 Rheological performance of dual regeneration SBS modified asphalt with different PAPI contents

从图9可以看出:①随着PAPI掺量的增加,COA再生SBS改性沥青延度逐渐下降,这是由于氨基甲酸酯基团的硬化效果比SBS结构重建所带来的低温性能提升效果更加明显导致的。当PAPI掺量增大到1.75%时,低温延展性不满足规范要求,因此PAPI掺量应小于1.75%;②COA再生SBS改性沥青软化点呈提升趋势,这表明修复后的SBS结构及氨基甲酸酯基团共同作用可以有效提升再生SBS改性沥青的高温稳定性。当PAPI掺量大于1.25%时,复合再生SBS改性沥青软化点达到了I-D级SBS改性沥青的性能要求。综合考虑复合再生SBS改性沥青的低温延度及高温稳定性,将PAPI的掺量初步设定为1.25%。

由图10可知:经历PAV老化后,SBS改性沥青的相位角平台区消失,说明SBS网络结构遭到了严重的破坏。当PAPI掺量增加到1.25%时,复合再生SBS改性沥青才出现明显的相位角平台区,说明老化后的SBS分子链需要一定数量PAPI才能实现聚

合物网状结构的修复。1.25%PAPI和1.75%PAPI掺量下的复合再生SBS改性沥青相位角平台区并无明显区别,这表明1.25%PAPI足以实现SBS结构的重建。此外,随着PAPI掺量增加,复合再生SBS改性沥青复数模量随之增大,再次说明PAPI本身也具有硬化效果。同时,1.25%PAPI掺量的再生SBS改性沥青与未老化SBS改性沥青之间的相位角曲线与复数模量曲线较为靠近,这表明复合改性剂可以有效恢复老化SBS改性沥青的流变特性。因此,将复合改性剂的最佳配比最终确定为12%COA+1.25%PAPI。

2.5 荧光显微镜测试结果

老化前后SBS改性沥青及最佳配比下的双重再生SBS改性沥青荧光图片如图11所示。

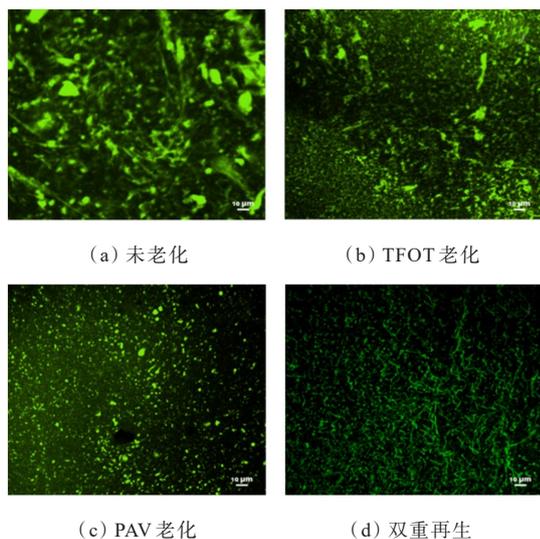


图11 SBS微观结构图

Figure 11 Microstructure of SBS

由图11可以明显地看出:未老化SBS改性沥青中存在致密且粗壮的SBS网络结构,但这种结构在TFOT老化后遭到明显的破坏,变成局部分块的稀疏网状结构以及互不相连的小片段。当经历PAV老化后,SBS网络结构全部降解成许多分离小片段,说明SBS改性剂完全失去其原有的改性效果。在复合再生剂的作用下,PAV老化SBS改性沥青中重新出现致密的聚合物交联结构,这进一步证明PAPI修复剂可以实现降解SBS片段的有效重建。

3 结论

本研究基于沥青组分平衡及SBS共聚物修复的双重再生机理,提出由COA和PAPI组成的复合再

生剂。根据物理和流变性能、分子量分布情况以及荧光显微镜测试结果,验证复合再生剂可以对老化SBS改性沥青进行整体再生,从而有效恢复SBS改性沥青的使用性能。另外,基于再生剂的性能恢复效果,分别确定COA和PAPI的最佳掺量。主要结论如下:

(1) 复合再生剂不会形成相位角平台区,而且其自身不会对SBS改性沥青的相位角平台区造成影响。

(2) 复合再生剂中的COA可以调节老化沥青的组分,PAPI可以连接老化SBS片段,进而实现老化SBS改性沥青使用性能的整体恢复。

(3) PAPI本身及其与SBS片段发生反应生成的氨基甲酸酯基团均对沥青具有硬化作用。

(4) 综合考虑再生SBS改性沥青的低温延度、高温稳定性以及黏弹特性,确定复合再生剂的最佳掺量为12%COA+1.25%PAPI。

参考文献:

References:

- [1] 李川,袁飞云,姜涛,等.不同类型SBS改性剂复合改性沥青性能影响研究[J].化工新型材料,2023,51(增刊1):184-190. LI Chuan, YUAN Feiyun, JIANG Tao, et al. Study on the effect of different types of sbs modifiers on the performance of composite modified asphalt[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(sup 1): 184-190.
- [2] 冯新军,杨洪阳,肖洪海,等.基于SBS结构修复的再生沥青性能及机理研究[J].中外公路,2024,44(4):56-63. FENG Xinjun, YANG Hongyang, XIAO Honghai, et al. Properties and mechanism of reclaimed asphalt based on SBS structure repair[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4): 56-63.
- [3] ZHANG D M, ZHANG H L, SHI C J. Investigation of aging performance of SBS modified asphalt with various aging methods[J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 445-451.
- [4] 斯建宁,任广海.SBS改性沥青老化性能影响研究[J].交通科技,2023(4):136-141. SI Jianning, REN Guanghai. Study on the effect of aging performance of SBS modified asphalt[J]. Transportation Science & Technology, 2023(4): 136-141.
- [5] 杨采迪,龚兴宇,韩晓斌,等.热老化对不同沥青组成结构和

- 性能的影响[J].科学技术与工程,2023,23(20):8839-8845.
- YANG Caidi,GONG Xingyu,HAN Xiaobin,et al.Influence of thermal aging on the composition structure and properties of different asphalts[J].Science Technology and Engineering,2023,23(20):8839-8845.
- [6] HOU X D, LIANG B, XIAO F P, et al. Characterizing asphalt aging behaviors and rheological properties based on spectrophotometry[J]. Construction and Building Materials,2020,256:119401.
- [7] 叶向前,邹晓翎,田发富.紫外老化对SBS-MCR复合改性沥青流变性能影响规律研究[J].中外公路,2022,42(6):236-240.
- YE Xiangqian, ZOU Xiaoling, TIAN Fafu. Study on influence of ultraviolet radiation aging on rheological properties of SBS-MCR modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(6):236-240.
- [8] CONG P L, LUO W H, XU P J, et al. Investigation on recycling of SBS modified asphalt binders containing fresh asphalt and rejuvenating agents[J].Construction and Building Materials,2015,91:225-231.
- [9] WILLIS JR, MARASTEANU M, BOARD T R. Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content[M]. Washington, D. C.: Transportation Research Board,2013.
- [10] DEVULAPALLI L, KOTHANDARAMAN S, SARANG G. Effect of rejuvenating agents on stone matrix asphalt mixtures incorporating RAP[J].Construction and Building Materials,2020,254:119298.
- [11] MAZZONI G, BOCCI E, CANESTRARI F. Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition),2018,5(3):157-168.
- [12] TEOH WP, NOOR ZH, NG CA, et al. Catalyzed waste engine oil as alternative binder of roofing tiles: Chemical analysis and optimization of parameters[J]. Journal of Cleaner Production,2018,174:988-999.
- [13] 李宁利,冯丽平,栗培龙.植物基生物质油对老化沥青再生效果研究[J].大连理工大学学报,2023,63(3):303-312.
- LI Ningli, FENG Liping, LI Peilong. Research about regeneration effect of plant based biomass oil on aged asphalt[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023,63(3):303-312.
- [14] 张强,高学凯,梁春雨.热再生沥青混合料低温蠕变行为及黏弹性分析[J].中外公路,2022,42(2):218-222.
- ZHANG Qiang, GAO Xuekai, LIANG Chunyu. Creep behavior and viscoelastic analysis of hot recycled asphalt mixture at low temperature[J].Journal of China & Foreign Highway,2022,42(2):218-222.
- [15] INGRASSIA LP, LU X H, FERROTTI G, et al. Investigating the “circular propensity” of road bio-binders: Effectiveness in hot recycling of reclaimed asphalt and recyclability potential[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,255:120193.
- [16] 高新文,刘朝晖.生物油再生沥青自愈合机理分析[J].中国公路学报,2019,32(4):235-242.
- GAO Xinwen, LIU Zhaohui. Self-healing mechanism of bio-oil recycled asphalt[J].China Journal of Highway and Transport,2019,32(4):235-242.
- [17] YANG S H, SUCIPTAN T. Rheological behavior of Japanese cedar-based biobinder as partial replacement for bituminous binder[J].Construction and Building Materials, 2016,114:127-133.
- [18] HUGENER M, PARTL M N, MORANT M. Cold asphalt recycling with 100% reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators[J]. Road Materials and Pavement Design,2014,15(2):239-258.
- [19] 李小龙.环氧大豆油再生SBS改性沥青性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.
- LI Xiaolong. Study on performance of ESO regenerated SBS modified asphalt[D].Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2020.
- [20] 徐雄.基于结构重建的再生SBS改性沥青及其混合料性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- XU Xiong. Investigation on properties of rejuvenated SBS modified bitumen and their mixture based on structure reconstruction[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2018.
- [21] 阎宝宝.基于SBS结构修复的老化改性沥青再生特性研究[D].西安:长安大学,2021.
- YAN Baobao. Study on regeneration characteristics of aging modified bitumen based on SBS structure repair[D]. Xi'an:Chang'an University,2021.
- [22] YANG X, ZHANG H L, ZHENG W Z, et al. A novel rejuvenating method for structural and performance recovery of aged SBS-modified bitumen[J].ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2022,10(4):1565-1577.
- [23] HAN X B, MAO S, XU S F, et al. Development of novel composite rejuvenators for efficient recycling of aged SBS modified bitumen[J].Fuel,2022,318:123715.