

不同再生剂对老化SBS改性沥青性能影响分析

李 锋¹, 张 军², 李有志², 王维营³

[1. 深圳市特区建工集团有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 深圳市天健(集团)股份有限公司, 广东 深圳 518000;

3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海市 201804]

摘 要: 采用3种不同厂家生产的再生剂, 进行再生SBS改性沥青的综合性能(包括传统的力学性能以及流变性能)评价, 从而选择更适合SBS改性沥青的再生剂, 并进行后续的用量计算。试验结果表明: 无论何种再生剂, 均对SBS改性沥青老化后的中、低温性能有促进作用, 但是延度、弹性恢复、黏韧性、韧性等指标, 不能恢复到原样SBS改性沥青的程度。综合比较, 加入A型再生剂, 所有性能均优于其他2种再生剂, 因此最终选择A型再生剂作为试验所用再生剂。

关键词: SBS改性沥青; 老化; 再生剂; 流变特性; 性能评价

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0093-05

Analysis on the Influence of Different Regenerants on Performance of Aged SBS Modified Asphalt

LI Feng¹, ZHANG Jun², LI Youzhi², WANG Weiyong³

[1. Shenzhen Special Zone Construction Engineering Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. Shenzhen Tianjian (Group) Co.,

Ltd., Shenzhen 518000, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Department of Education, Tongji University,

Shanghai 201804, China]

Abstract: Three different manufacturers of regenerants are used to evaluate the comprehensive performances (including traditional mechanical and rheological properties) of regenerated SBS modified asphalt so as to select the more suitable regenerant for SBS modified asphalt, and calculate the subsequent dosage. The experimental results indicate that no matter what kind of regenerant is used, it all promotes the medium and low-temperature performances of SBS modified asphalt after aging, but the indicators such as ductility, elastic recovery, viscosity and toughness cannot be restored to the level of the original SBS modified asphalt. After comprehensive comparison, the addition of Type A regenerant will make all performances more superior to the other two regenerants. Therefore, Type A regenerant is ultimately chosen as the regenerant for the experiment.

Keywords: SBS modified asphalt; ageing; regenerant; rheological properties; performance evaluation

0 引 言

沥青路面在服役过程中, 沥青会发生老化, 从而影响其路用性能和服役寿命。沥青老化主要表现为分子结构的氧化和聚合, 导致其黏度增加、韧性下降、脆性增强, 这在交通量大的道路和极端气候条件下表现尤为明显^[1]。苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(Styrene-Butadiene-Styrene, SBS)改性沥青因其优异的高温抗变形、低温抗脆裂及抗裂性能, 被广泛用于高等级道

路的铺设。然而, SBS改性沥青在长时间使用中难以避免地会发生老化, 导致诸如裂缝和龟裂等病害^[2-3]。

再生剂是一种用于恢复老化沥青性能的材料, 已在再生沥青研究领域得到广泛应用。通过补充老化沥青中流失的轻组分, 再生剂能够改善其流动性, 使其性能接近新沥青的水平, 从而延长使用寿命^[4]。现有再生剂种类繁多, 包括矿物油、植物油、聚合物及其复合物等, 不同再生剂对老化沥青的作用效果因其化学成分和物理性质的不同有所差异^[5-6]。

再生剂在普通沥青再生中的应用已经较为成熟, 但是对于SBS改性沥青而言, 其老化过程不仅有沥青的老化还伴随SBS改性剂的降解, 因此有必要研究不同再生剂对老化SBS改性沥青的再生效

收稿日期: 2024-12-06

作者简介: 李锋(1974—), 男, 学士, 助理工程师, 从事道路工程研究工作。

通信作者: 王维营(1988—), 男, 博士, 副研究员, 从事道路与铁道工程研究工作。电子信箱: wangwy880521@nuaa.edu.cn

果^[7]。研究表明,某些再生剂在恢复SBS改性沥青的低温抗裂性和高温稳定性方面具有显著效果,但其效果差异较大,部分再生剂甚至会削弱高温稳定性,或引发相容性问题^[8]。因此,系统性研究再生剂对SBS改性沥青的影响,对于优化配方设计、提升再生效果具有重要意义。

本文研究的目的是探讨不同类型和掺量的再生剂对老化SBS改性沥青性能的影响。通过基本指标大概确定再生剂的用量范围,进一步缩小再生剂用量,进行流变性能评价,结合高、中、低温性能测试,系统分析再生剂在恢复老化SBS改性沥青性能方面的作用机制,为再生剂在SBS改性沥青中的合理应用提供科学依据。

1 原材料及性能表征方法

1.1 SBS改性沥青

首先对所用SBS改性沥青的基本指标进行了检测,检测结果见表1,可以看到本文所采用的成品

SBS改性沥青性能基本指标均满足规范要求。

表1 SBS改性沥青性能指标

性能指标		试验结果	技术要求
	针入度(25℃)/0.1 mm	62	60~80
	软化点/℃	60.4	≥55
	延度(5℃)/cm	45	≥30
	旋转黏度(135℃)/Pa	0.925	≤3
	弹性恢复(25℃)/%	85.43	≥65
	黏韧性/(N·m)	46.4	—
	韧性/(N·m)	39.8	—
质量变化/%		-0.201	±1.0
TFOT后	残留针入度比/%	67.7	≥60
	残留延度(10℃)/cm	20	≥20

本文所用的老化SBS改性沥青均是首先经过薄膜烘箱(RTFO)173℃老化5 h,然后压力老化(PAV)105℃老化20 h所得,所得老化沥青的基本性能指标见表2。通过与表1对比可以明显看到SBS改性沥青老化后针入度下降,软化点升高,5℃延度几乎为零;黏韧性方面,老化后沥青变硬,刚度变大,因此其拉力峰值增大,而黏韧性与韧性则明显地减弱。

表2 老化沥青基本性能指标

沥青	针入度(25℃)/0.1 mm	软化点/℃	延度(5℃)/cm	黏韧性		
				拉力峰值/N	黏韧性/(N·m)	韧性/(N·m)
老化沥青	26	73	—	908.8	22.62	12.91

1.2 再生剂

本文采用3种再生剂进行SBS改性沥青的再生研究,分别命名为S、J、A。每种再生剂采用3种不同的添加量。根据ASTM D4552要求,测试了再生剂的

主要技术指标,如表3所示。

由表3数据可以看出,由于所用再生剂中所包含的轻质组分(芳香分)含量不同,各指标亦有所差异。

表3 再生剂基本指标

再生剂类型	闪点/℃	饱和分含量/%	芳香分含量/%	薄膜烘箱试验前后黏度比	薄膜烘箱试验前后质量变化/%	密度/(g·cm ⁻³)
S	217	30.16	30.16	2.160	-1.625	1.097
J	229	59.77	31.86	1.179	-1.176	0.994
A	221	54.52	43.70	1.104	-1.653	1.031

2 试验结果与讨论

2.1 再生剂用量的初选

本文选取的3种再生剂,针对不同的沥青、不同的老化程度下,其用量也是不同的。在评价老化SBS改性沥青再生效果时,为了能够使得再生剂能够在有效范围内使用,因此需要对其进行用量的初步确定。在参考再生剂厂家建议用量的基础上,各加减5%的掺量进行再生剂用量的初选,三种再生剂的初选用量为:再生剂S为10%、15%、20%,再生剂J为5%、10%、15%,再生剂A为3%、8%、13%。根据传统的针入度试验,进行再生剂用量的大致确定。每种

再生剂的针入度结果见图1,拟合每种再生剂用量与针入度的关系,见表4。以原样SBS改性沥青针入度(62/0.1 mm)为基准,通过表4,计算每种再生剂的大致用量为:再生剂S大概的最佳用量沥青质量的18.4%,再生剂J为13.2%,再生剂A为9.8%。这是按照传统针入度方法确定的再生剂用量,对于普通沥青而言,这个方法是适用的,但是对于SBS改性沥青,由于其内部成分的复杂性,依赖单指标显然是不全面的,只是可以把单指标得到的结果作为参考,然后进行更精确的用量确定,从而更准确地评价再生后的性能。

经过再生剂的粗选,对其用量有了大概的范围,为了更准确地确定适合SBS改性沥青再生的再生剂

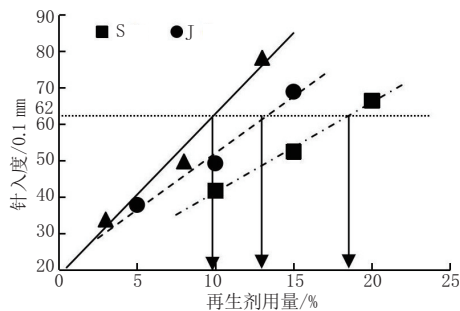


图1 再生剂用量初选结果

表4 不同再生剂与针入度拟合

再生剂	S	J	A
拟合公式	$y = 2.47x + 16.55$	$y = 3.11x + 20.88$	$y = 4.44x + 18.36$

种类及用量,从不同的角度对再生沥青的综合性能进行评价、分析、比较。再上述粗选结果的基础上 $\pm 3\%$,即再生剂S用量:15%、18%、21%;再生剂J用量:10%、13%、16%;再生剂A用量:7%、10%、13%。并根据对传统力学性能、流变性能的影响,综合分析老化SBS改性沥青的再生效果。

2.2 传统力学性能

根据针入度、软化点、延度、弹性恢复、黏韧性等一系列传统的力学性能指标对再生后的SBS改性沥青进行比较分析,为了更直观地观察再生剂种类、添加量的不同如何影响老化SBS改性沥青,将每种性能指标分别作图,见图2、图3,其中OB代表原样沥青,Aged代表老化沥青(下同)。

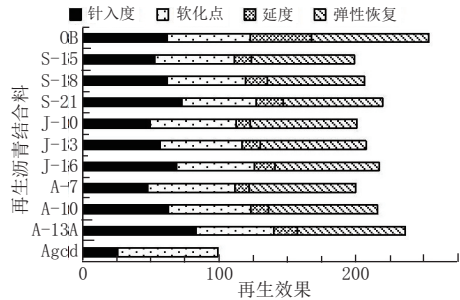


图2 再生SBS改性沥青基础性能

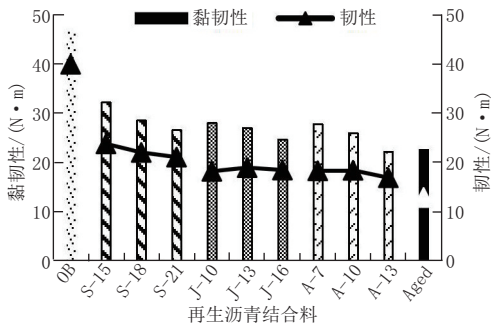


图3 再生SBS改性沥青黏韧性

由图2、图3可以看出,加入再生剂后,沥青性能均得到不同的程度的恢复。其中,延度、弹性恢复、黏

韧性、韧性等指标,不能恢复到原样SBS改性沥青的程度,尤其是延度。因此,SBS改性沥青的再生是“不完全再生”,由于内部大分子的增大,沥青的延展性、弹性均不可逆。因此,应当综合考虑沥青的多种性能的变化,横向比较选择恢复程度相对较好的再生剂。

3种再生剂,对不同性能的恢复情况也不尽相同,S型再生剂对延度的恢复最为理想,A型再生剂对弹性恢复的恢复较为可观。因此,本文继续从流变角度入手,进一步对高、中、低温性能的恢复进行评价分析。

2.3 流变力学性能

从流变性的角度(PG分级试验、MSCR试验)对添加不同再生剂后性能进行进一步分析。

2.3.1 PG高温试验

以原样沥青车辙因子($G^*/\sin\delta$)1.0 kPa、短期老化RTFO后沥青2.1 kPa为临界值,对原样及RTFO后再生SBS改性沥青的临界温度作图,临界温度越高代表其高温抗车辙能力越强^[9-10]。结果见图4,由于原样与短期老化的趋势相似,因此仅以原样沥青的临界温度作图。

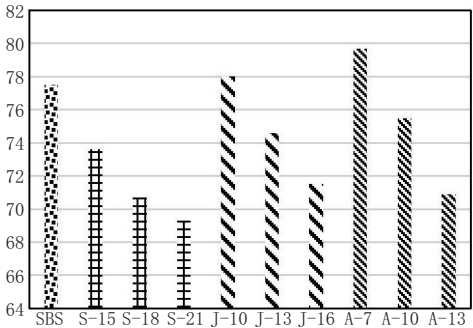


图4 原样再生SBS改性沥青临界温度

由图4可以看出,3种再生剂相比,添加A型再生剂的SBS改性沥青相比于其他两种具有更高的临界温度,添加S型再生剂的沥青临界温度则最低。因此相比较来说,添加A型再生剂的沥青具有最为优良的高温性能。

2.3.2 PG中温试验

PG中温试验一般用来评价沥青结合料的抗疲劳特性,以沥青长期老化后的疲劳因子($G^*\sin\delta$)指标达到5 000 kPa为评价标准,5 000 kPa越小代表抗疲劳特性越强,反之则越弱^[11-12]。再生SBS改性沥青经过RTFO+PAV之后测得疲劳因子 $G^*\sin\delta$ 结果见表5。

由表5可以看出,三种再生沥青的疲劳因子均比原样SBS改性沥青的要小,因此在疲劳因子这一角度,再生后的沥青抗疲劳性能得到一定程度的提升。

表5 不同种再生SBS改性沥青疲劳因子

再生剂种类	掺量/%	$G^*\sin\delta$ / kPa					
		25 ℃	22 ℃	19 ℃	16 ℃	13 ℃	10 ℃
原样	0	3 021	4 369	6 222			
S	15	2 550	3 754	5 429			
	18	2 387	3 587	5 287			
	21	2 299	3 484	5 179			
J	10	1 765	2 570	3 665	5 136		
	13	1 399	2 077	3 027	4 340	6 102	
	16	1 188	1 763	2 590	3 742	5 310	
A	7	1 827	2 619	3 703	5 153		
	10	1 192	1 756	2 552	3 655	5 156	
	13	855	1 273	1 884	2 760	3 984	5 659

相比较而言,A型再生剂对其提升最为明显。

2.3.3 PG低温试验

本文采用-12、-18、-24 ℃ 3个温度下试验,测定再生SBS改性沥青的劲度模量*S*与*m*值。所得试验结果见表6。

表6 不同种再生SBS改性沥青BBR试验结果

再生剂	掺量/%	劲度模量 <i>S</i>			<i>m</i> 值		
		-12 ℃	-18 ℃	-24 ℃	-12 ℃	-18 ℃	-24 ℃
SBS改性沥青		134	287	529	0.338	0.272	0.227
S	15%	152.0	310	671	0.324	0.265	0.213
	18%	145.0	287	629	0.333	0.243	0.215
	21%	135.0	307	617	0.336	0.270	0.212
J	10%	95.1	231	433	0.347	0.281	0.242
	13%	82.0	206	406	0.367	0.306	0.255
	16%	72.5	189	368	0.392	0.314	0.257
A	7%	86.8	205	402	0.341	0.302	0.241
	10%	68.3	164	318	0.378	0.315	0.294
	13%	56.5	144	296	0.398	0.340	0.284

BBR试验结果中,劲度模量*S*越小,*m*值越大,代表低温性能越好;反之则越差^[13-14]。由表6结果可以看出,相同温度下,劲度模量*S*值的大小关系为:S-A<S-J<S-S,而且A型与J型再生剂的3种掺量下,*S*值均小于原样的沥青;*m*值与*S*值的大小是相反的。因此,比较而言A型再生剂最有利于老化SBS改性沥青低温性能的提升。

2.3.4 多应力重复蠕变恢复试验

多应力重复蠕变恢复(multiple stress creep recover, MSCR)试验是利用沥青的黏弹特性,固定间隔时间内循环施加恒应力(0.1与3.2 kPa),观察沥青结合料在蠕变与恢复阶段内应变的趋势,从而分析沥青的高温性能^[15-16]。具体试验流程参考AASHTO TP70试验规程^[17]。根据PG高温试验的结果,本节选取64 ℃作为试验温度进行MSCR试验,计算

3.2 kPa应力水平下的不同再生沥青的不可恢复蠕变柔量*J_{nr}*和恢复率*R*,结果见图5。

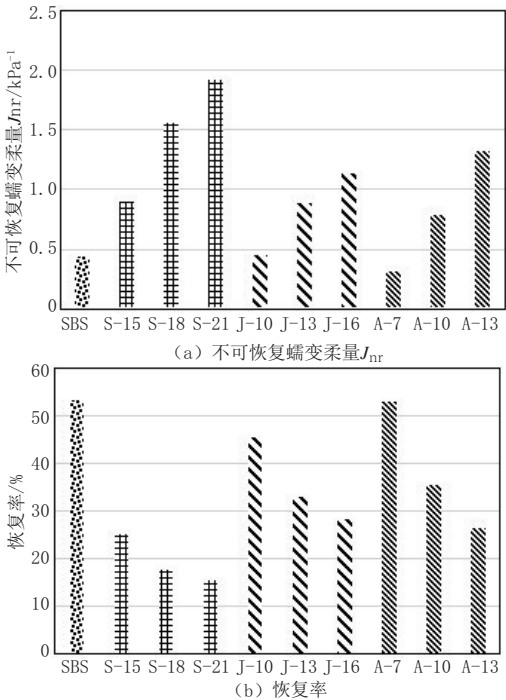


图5 MSCR试验*J_{nr}*和*R*

尽管*R*指标通常用于评估沥青结合料的弹性变形潜力,但永久变形的累积主要受到不可恢复柔量(*J_{nr}*)的影响^[18-19]。在相同条件下,3种再生结合料的抗永久变形能力存在差异,其顺序为:SBS-A>SBS-J>SBS-S。特别是SBS-S再生沥青在最低掺量时,*J_{nr}*值仍高于原样SBS改性沥青,而其他两种则差异不大。因此,加入S型再生剂会影响沥青结合料的高温性能。根据新泽西州Rowan大学Yusuf Mehta博士的研究,针对不同交通等级,原样沥青的*J_{nr}*建议范围如下:*J_{nr}*≤500 /Pa适用于极重交通(超过3 000万ESAL的慢速交通);*J_{nr}*≤1 000 /Pa适用于超重交通(大于3 000万ESAL);*J_{nr}*≤2 000 /Pa适用于标准交通(1千万~3千万ESAL);*J_{nr}*≤4 000 /Pa适用于一般交通(约1 000万ESAL)^[20]。根据这些标准,所有再生结合料均可满足标准交通要求,而SBS-A和SBS-J在最低掺量时则可以用于极重交通。

3 结 论

本文通过对老化的SBS改性沥青添加3种不同类型的再生剂,系统分析了其高温、中温及低温性能的变化,并选出最适合SBS改性沥青再生的再生剂。得出以下结论。

(1)再生剂的引入能够显著改善老化SBS改性沥青的多项性能。然而,在延度、弹性恢复、黏韧性

和韧性等指标上,仍无法完全恢复至原始 SBS 改性沥青的水平,尤其是在延度方面表现尤为明显。

(2)无论采用哪种再生剂,随着掺量的增加,SBS 改性沥青的高温性能会有所下降,而中温和低温性能则显著提升。这表明再生剂的作用机制主要在于补充轻质组分,改善其流变特性。

(3)通过不同类型再生剂及其掺量对再生沥青进行的常规性能和流变性能测试发现,A 型再生剂在高温、中温及低温性能方面均优于其他两种再生剂。因此,最终选择 A 型再生剂作为试验用再生剂。以原始 SBS 改性沥青的性能指标为参照,确定 A 型再生剂的最佳掺量为老化沥青质量的 10%。

(4)本文研究发现 SBS 改性沥青最佳再生剂用量不适合仅采用传统针入度方法确定,应关注于沥青流变性的变化规律,从而采用平衡设计法来确定。

参考文献:

- [1] 陈超,李伟,张宏斌.SBS 改性沥青老化机理及再生技术研究[J].公路交通科技,2018,35(12):45-52.
- [2] 王伟,赵静,张磊.再生剂对老化 SBS 改性沥青性能的影响[J].建筑材料学报,2020,23(4):89-95.
- [3] 李敏,高峰,何涛.生物基再生剂对老化沥青的影响研究[J].石油沥青,2019,33(3):66-72.
- [4] ZHANG T, LUO J, MA J. Effects of Rejuvenators on Aging and Performance of Recycled Asphalt Binders: A Review[J]. Construction and Building Materials, 2019(211): 793-805.
- [5] 吴刚,林飞,陈军.再生剂类型及用量对 SBS 改性沥青的影响[J].交通运输工程学报,2020,36(6):72-79.
- [6] WU S, ZENG W, LIN P. Effect of Rejuvenators on Performance and Microstructure of Aged SBS Modified Asphalt[J]. Materials, 2018, 11(12): 2564.
- [7] 唐明,徐洋,黄强.植物油再生剂对老化沥青的性能改善[J].材料工程,2021,39(8):123-128.
- [8] XU H, HUANG X, CHEN D. Evaluation of Polymer-Modified Asphalt Binders Containing Rejuvenators for High-Temperature Performance[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2019, 145(2): 04019006.
- [9] XIAO F, AMIRKHANIAN S, WANG H, *et al.* Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2014(64): 316-323.
- [10] The Asphalt Institute. Performance graded asphalt binder specification and testing, SP-1[M]. Lexington: Asphalt Institute, 2003.
- [11] XIAO F, PUTMAN B, AMIRKHANIAN S. Rheological characteristics investigation of high percentage RAP binders with WMA technology at various aging states[J]. Construction and Building Materials, 2015(98): 315-324.
- [12] BAHIA H U, ANDERSON D A. The New Proposed Rheological Properties of Asphalt Binders: Why Are They Required and How Do They Compare to Conventional Properties[C]//Physical Properties of Asphalt Cement Binders, ASTM STP 1241, John C. Hardin, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995.
- [13] AASHTO T 313-12, Standard method of test for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)[S].
- [14] 吴其晔.高分子材料流变学[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [15] GUNGAL L, YUSOFF N, HAMZAH M O. Effects of RH-WMA additive on rheological properties of high amount reclaimed asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2016(114): 665-672.
- [16] SUN Y, WANG W, CHEN J. Investigating impacts of warm-mix asphalt technologies and high reclaimed asphalt pavement binder content on rutting and fatigue performance of asphalt binder through MSCR and LAS tests [J]. Journal of Cleaner Production, 2019(219): 879-93.
- [17] AASHTO TP70, Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)[S].
- [18] 杨赞华,谭昆华.多应力蠕变恢复试验的流变学分析[J].中外公路,2014(5):291-295.
- [19] 王维营.大比例温拌再生沥青及混合料性能研究[D].大连:大连理工大学,2018.
- [20] HUANG Y H. Pavement analysis and design[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 2003.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

