

# SBS/胶粉复合改性沥青混合料研究进展

孙泽强<sup>1</sup>, 周晓蕾<sup>2</sup>, 宋亮<sup>3</sup>, 王朝辉<sup>2</sup>

(1. 新疆交通投资有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 长安大学 公路学院;  
3. 新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院)

**摘要:**为进一步推进公路建设绿色发展,促进 SBS/胶粉复合改性沥青混合料的研究与应用,系统梳理当前 SBS/胶粉复合改性沥青混合料相关研究成果,对比分析现有制备工艺,选定了其常用级配,推荐矿料级配关键筛孔通过率,全面对比分析 SBS/胶粉复合改性沥青混合料路用性能,评价不同沥青混合料的路用性能差异性。结果表明:湿法工艺较干法胶粉分散程度更高、混合料路用性能更佳、应用更广;SBS/胶粉复合改性沥青混合料常采用 AC-13 级配,鉴于胶粉溶胀特性,建议将 4.75、2.36、0.075 mm 筛孔通过率分别控制在 38%~50%、27%~37%、5%~6%;SBS/胶粉复合改性沥青混合料动稳定度、弯曲破坏应变、疲劳寿命较 SBS、胶粉改性沥青混合料均更具优势,其均值分别达 6 504 次/mm、4 610.9  $\mu\epsilon$ 、369 833 次(应变 400  $\mu\epsilon$ )。

**关键词:** 道路工程; SBS/胶粉复合改性沥青; 路用性能; 研究进展

## 1 前言

近年来,经济环保、性能优良的绿色公路受到广泛关注,交通运输部发布的《关于实施绿色公路建设的指导意见》(2016)与《关于全面深入推进绿色交通发展的意见》(2017)均明确指出要将绿色公路建设作为未来公路建设的主要方向。以废胎胶粉为改性剂的橡胶沥青混合料可实现废旧资源循环利用,成为践行绿色道路发展要求的重要途径。传统橡胶沥青胶粉掺量大,其施工和易性差、易致压实不足,SBS/胶粉复合改性沥青混合料既可提高沥青路面使用性能又可降低胶粉掺量,成为橡胶沥青路面发展的重要方向。

国外学者针对 SBS/胶粉复合改性沥青混合料的改性剂结构、制备工艺、助剂等方面进行了研究。Mario Manosalvas-Paredes 等采用胶粉改性 SBS 沥青制备复合改性沥青混合料,与掺有纤维的 SBS 改性沥青混合料对比,发现复合改性沥青混合料的抗永久变形能力优异;Chengduo Qian 等探讨了胶粉粒径对 SBS/胶粉复合改性沥青混合料性能的影响,发现较大

粒径的胶粉可增强沥青混合料的抗车辙性能及储存稳定性;Vignali Valeria 等提出一种不同于传统干、湿法工艺的干-混工艺,由此制得的沥青混合料具有良好的高低温性能;Yongchun Cheng 等研究发现掺入 SA 温拌剂可显著改善 SBS/胶粉复合改性沥青混合料的低温抗裂性和抗车辙性能。中国研究则主要集中于沥青黏结料、混合料制备工艺的选择优化与级配调整。刘勇以干法工艺制备 SBS/胶粉复合改性沥青混合料,电镜分析证明集料、胶粉、沥青的三相体系已经形成;熊伟等以湿法工艺将 SBS 掺入 TB 橡胶沥青,对比发现 3% SBS+15% TB 配比的混合料综合性能最优;杨光参考橡胶沥青的湿法工艺将 CR/SBSCMA 的制备工艺分为准备、投料预混、研磨分散、发育及储存等阶段,细化了混合料工艺;周政优化矿料级配得到符合复合改性沥青特点的 AC-13G 级配,并与 AR-SMA13 对比发现其高温性能更优但低温性能较差;褚付克等利用“贝雷法”及“I 法”优化美国德州 AR-SMA-13 后提出 WRAC-13 级配,取得良好路用性能。综上,当前学者从制备工艺、矿料级配等方面已进行了大量性能优化工作。为进一步揭示 SBS/胶粉复合改性沥青混

收稿日期:2021-09-02(修改稿)

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(编号:2020-D01-A92);中国博士后科学基金资助项目(编号:2020M683709XB);交通运输部重点科技项目(编号:2019-MS1-024);新疆维吾尔自治区交通运输行业科技项目(编号:2019-ZD1-016)

作者简介:孙泽强,男,高级工程师。

合料路用性能及改性机理并改善其不足,应系统梳理 SBS/胶粉复合改性沥青混合料制备工艺、矿料级配及路用性能变化规律,以便为后续研究与应用奠定基础。

鉴于此,该文在全面调查 SBS/胶粉复合改性沥青混合料相关研究成果基础上,对比分析 SBS/胶粉复合改性沥青混合料制备工艺与级配,阐明复合改性沥青混合料性能特点,从而为今后深入研究与工程应用提供参考。

## 2 SBS/胶粉复合改性沥青混合料制备工艺对比

为优选 SBS/胶粉复合改性沥青混合料制备工艺,

表 1 干、湿法工艺参数对比

工艺	胶粉掺量/%	橡胶粒径/mm	拌和温度/℃	拌和时间/s	设备要求
干法	混合料的 1~3	1.0~6.3	165~175	10~60,60~90,60~90	无需专用设备
湿法	基质沥青的 10~20	<1.0	180~190	5~10,60,60	需专用设备

注:3 个拌和时间依次代表改性剂与矿料干拌、矿料和胶粉及 SBS 改性沥青拌和、加入矿粉拌和。

干法工艺(掺加 TOR)的拌和温度较湿法工艺低,其各阶段拌和时间较湿法均有延长,这是由于湿法工艺在生产复合改性沥青时胶粉已初步溶解分散,而干法工艺胶粉在混合料拌和时加入,需较长拌和时间以使胶粉与沥青反应更充分。此外,湿法工艺需专用设备生产改性沥青,成本更高;干法工艺对设备要求低,使用现有设备即可生产,施工便利。与干法工艺相比,湿法工艺在高温高速剪切下可使改性剂与沥青接触产生反应,沥青改性效果稳定,此工艺制备的复合改性沥青混合料高低温性能、水稳定性较好。

综上所述,湿法工艺较干法工艺虽耗能大、胶粉掺量略低,但改性效果更稳定,当前 SBS/胶粉复合改性沥青混合料制备工艺仍以湿法为主。

## 3 SBS/胶粉复合改性沥青混合料级配调查与评价

全面调查中国 SBS/胶粉复合改性沥青混合料矿料级配情况,梳理矿料级配的主要类型与各筛孔通过率,同时结合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》推荐的级配范围进行评价,具体级配见图 1。

调查的 40 余项 SBS/胶粉复合改性沥青混合料矿料级配中,采用连续型密级配 AC 者占 63%,采用间断级配 SMA 者占 34%,其余为开级配 OGFC。考虑

系统梳理已有研究成果。当前 SBS/胶粉复合改性沥青混合料制备工艺主要分为干法与湿法两种,其中湿法工艺先经高速剪切使改性剂与基质沥青充分反应,后经高温发育得到复合改性沥青以制备 SBS/胶粉复合改性沥青混合料;干法工艺则将矿料与胶粉在拌锅中拌和规定时间后将 SBS 改性沥青掺入,继续拌和发育后得到 SBS/胶粉复合改性沥青混合料。两种 SBS/胶粉复合改性沥青混合料制备工艺参数见表 1。

由表 1 可知:干法工艺所用废胎胶粉粒径较湿法大,干法工艺胶粉掺量为混合料质量的 1%~3%,而湿法为基质沥青的 10%~20%,换算后为混合料的 0.43%~0.79%(油石比 5%),干法工艺废旧轮胎利用量更大。

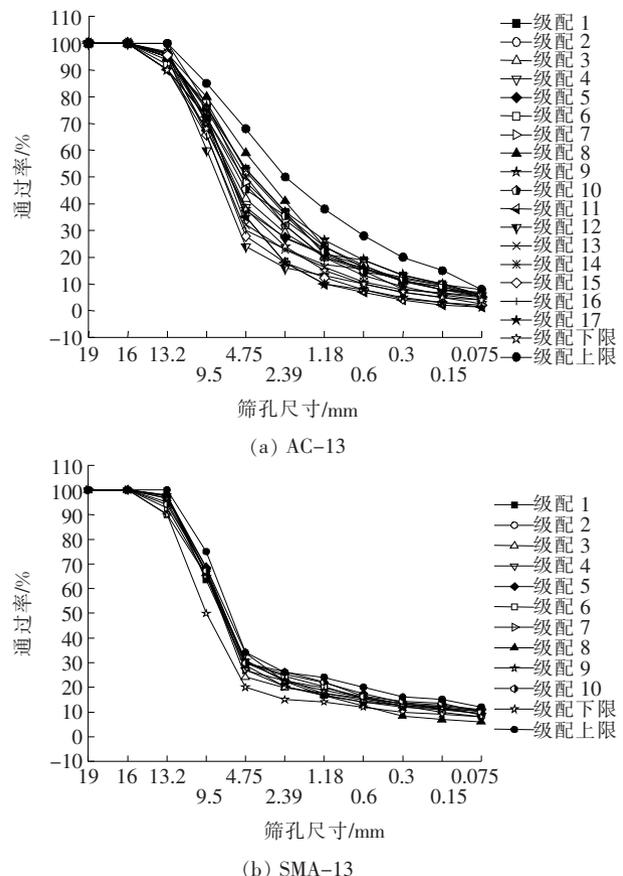


图 1 SBS/胶粉复合改性沥青混合料级配曲线

到胶粉膨胀、反弹性质,若矿料级配采用低间隙率的

AC级配,胶粉易干涉粗骨料之间的嵌挤而导致混合料路用性能下降,故为给胶粉膨胀提供空间,SBS/胶粉复合改性沥青混合料常采用间断级配或开级配。其原因主要有:①调整AC关键筛孔通过率,使级配适当变粗,即可达到类似于开级配或间断级配的效果;②出于经济性考虑,SMA粗集料骨架间隙率较大,需大量沥青填充,造价较高;③中国沥青路面常采用AC,而OGFC使用较少,若仍主要采用开级配不利于SBS/胶粉复合改性沥青混合料的推广与应用,因此当前复合改性沥青混合料制备时主要采用了AC级配并对其关键筛孔通过率进行调整以适应复合改性沥青特点。

由图1可得:调查的AC-13级配中,多数调查级配处于规范规定范围内,其中级配11~13、15、17因参考美国亚利桑那州橡胶沥青矿料级配,其粗集料偏多、细集料偏少使部分尺寸筛孔通过率低于规范下限。调查级配中4.75 mm筛孔通过率为24%~59%,2.36 mm筛孔通过率为16%~41%,70%的级配处于规范中值以下,0.075 mm筛孔通过率为1.25%~8%,76%位于规范中值以下,处于较低水平,分析其原因为

胶粉可膨胀作为一部分细料发挥作用,要求矿料有更大间隙以填充改性沥青。经以上分析并结合路用性能分析,建议AC-13级配4.75、2.36、0.075 mm筛孔通过率控制为38%~50%、27%~37%、5%~6%。

调查的SMA-13级配中,除级配8中的0.3、0.15、0.075 mm筛孔通过率略低于级配下限以外,其余级配均处于规范规定范围以内,其中4.75 mm筛孔通过率为24.1%~33.9%,2.36 mm筛孔通过率为20.2%~26.1%,均处规范要求中值以上,0.075 mm筛孔通过率为6%~10.5%。综上可知,SMA-13级配4.75、2.36、0.075 mm筛孔通过率宜分别控制为27%~33%、20%~24%、8%~10.5%。

## 4 SBS/胶粉复合改性沥青混合料路用性能调查与评价

### 4.1 SBS/胶粉复合改性沥青混合料路用性能评价

经调查,SBS/胶粉复合改性沥青混合料中,SBS掺量为2%~3.5%,胶粉掺量为10%~20%,SBS/胶粉复合改性沥青混合料路用性能指标如图2所示。

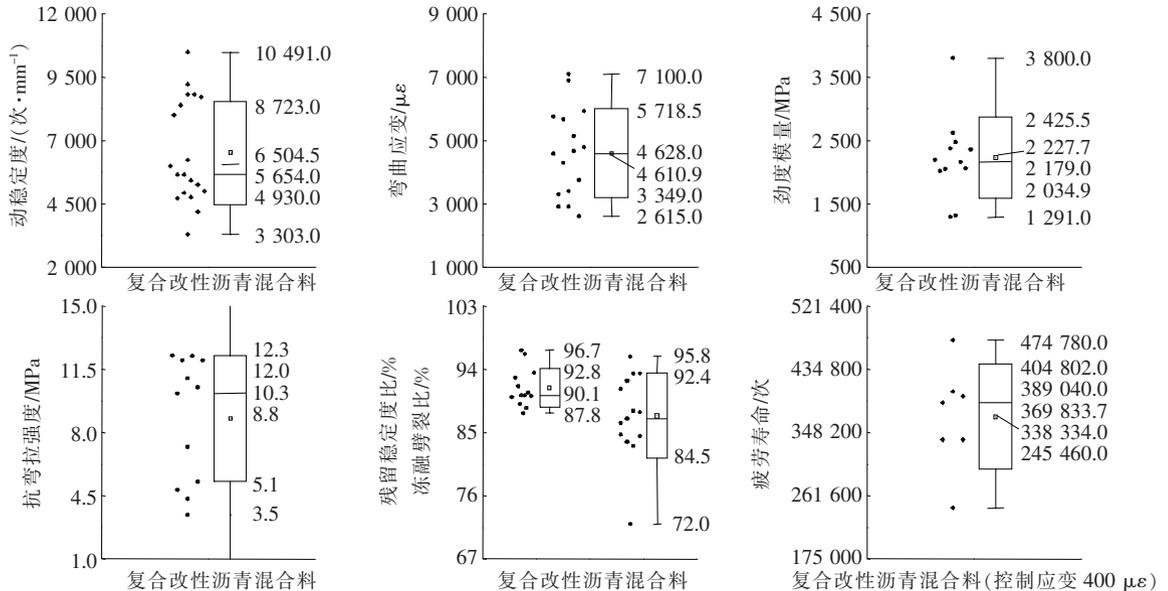


图2 SBS/胶粉复合改性沥青混合料路用性能

由图2可知:

SBS/胶粉复合改性沥青混合料动稳定度分布均匀,均值为6504.5次/mm位于中位线5654次/mm上方,多数复合改性沥青混合料高温性能良好。弯曲破坏应变50%的数据为3349~5718.5  $\mu\epsilon$ ,满足规范严寒区大于3000  $\mu\epsilon$ 的要求。抗拉强度四分位数区间为5.1~12.0 MPa,中位线10.3 MPa以上数据分

布集中,平均值为8.8 MPa位于中位线以下,部分复合改性沥青混合料极限抗弯拉强度较低,这可能是采用了粒径较大的胶粉所致。劲度模量四分位数区间为2034.9~2425.5 MPa,此区间数据分布集中。浸水马歇尔试验残留稳定度比的下限为87.8%,满足规范潮湿地区大于85%的规定。冻融劈裂比四分位数区间为84.5%~92.4%,满足规范大于80%的要求,SBS/胶

粉复合改性沥青混合料的水稳定性良好。采用四分点加载(控制应变  $400 \mu\epsilon$ )方式测量混合料疲劳寿命, 50%的数据为 338 334~404 802 次,最低可达 245 460 次,说明复合改性沥青混合料抗疲劳性能较好。

由此可知,SBS/胶粉复合改性沥青混合料高温性能、水稳定性优良,低温性能整体较好,抗疲劳性能优良。

### 4.2 不同沥青混合料路用性能对比

为明确不同改性沥青混合料路用性能的差异,系

统梳理了 SBS/胶粉复合改性沥青混合料路用性能研究成果及其对应胶粉改性沥青混合料、SBS 改性沥青混合料路用性能研究数据,对比不同改性沥青混合料路用性能指标。其中复合改性沥青混合料所用沥青中 SBS 掺量为 2%~3.5%,胶粉掺量为 10%~20%,胶粉改性沥青混合料所用沥青的胶粉掺量为 10%~22%,SBS 改性沥青混合料中所用沥青的 SBS 掺量为 3%~4.5%,具体性能指标对比见图 3。

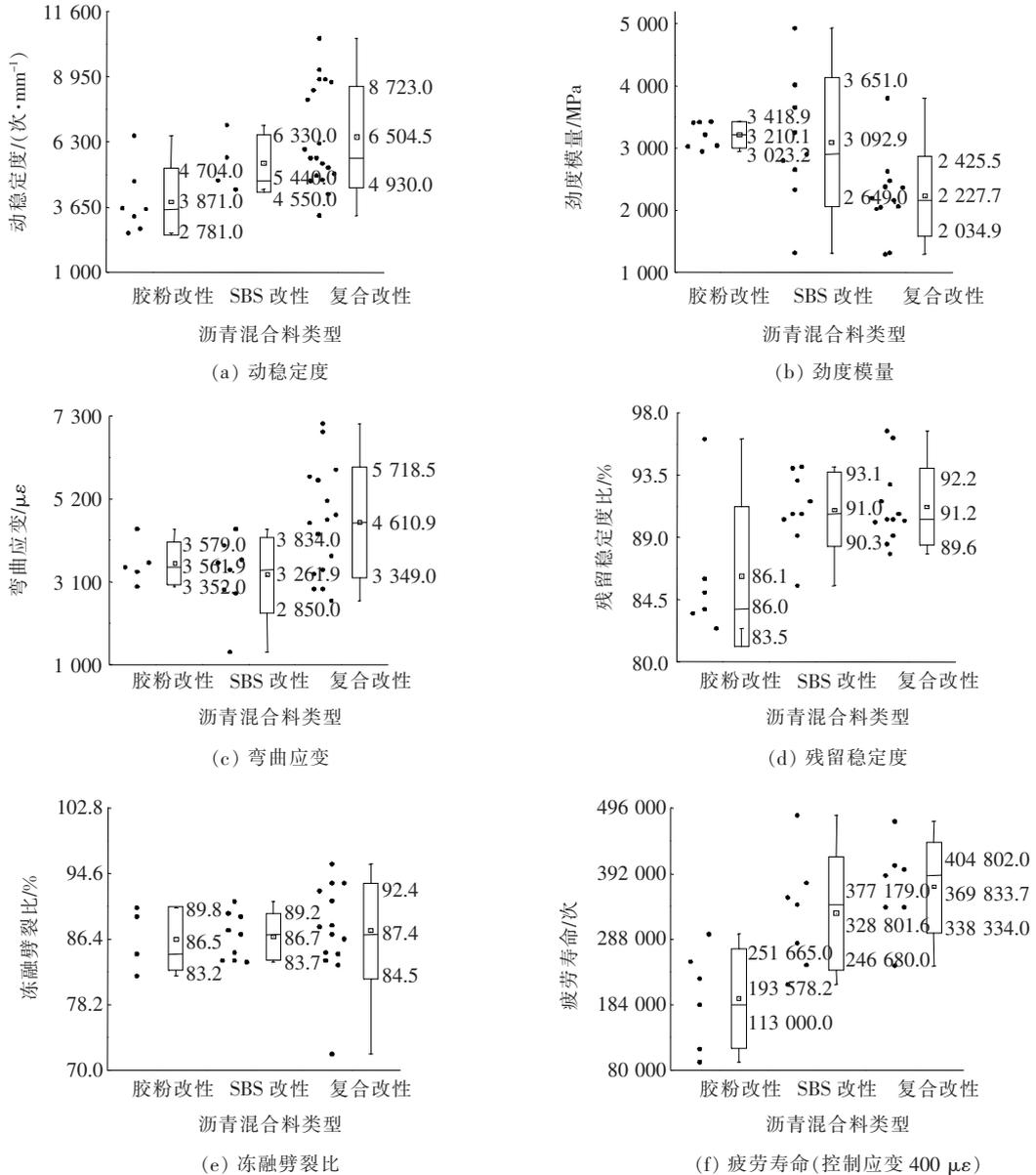


图 3 不同沥青混合料路用性能对比

四分数区间长度常作为分析箱形图数据特点的重要指标,由图 3(a)可知:胶粉改性沥青混合料、SBS 改性沥青混合料、SBS/胶粉复合改性沥青混合料动稳定度分别为 1 923、1 780、3 793 次/mm。SBS/胶粉复合

改性沥青混合料动稳定度集中在 4 930~8 723 次/mm,其高温稳定性优于其他两种沥青混合料,但数据离散性较大。SBS 改性沥青混合料、胶粉改性沥青混合料动稳定度均值分别为 5 440、3 871 次/mm,

由此可知,胶粉对沥青混合料的高温性能改善效果不及SBS。其原因可能是由于胶粉具有膨胀弹性特性,导致压实不足,而SBS与胶粉复合后两者性能可得到互补。

由图3(c)可知:胶粉改性沥青混合料、SBS改性沥青混合料、SBS/胶粉复合改性沥青混合料极限弯曲破坏应变分别为227、984、2 369  $\mu\epsilon$ ,SBS/胶粉复合改性沥青混合料数据离散性较大,但其均值最大为4 610.9  $\mu\epsilon$ 。由此可知:SBS/胶粉复合改性沥青混合料的低温性能远优于其余两种沥青混合料。胶粉改性沥青混合料的弯曲破坏应变高于SBS改性沥青混合料,因而胶粉对沥青混合料的低温性能改善效果优于SBS。由图3(b)可知:胶粉改性沥青混合料、SBS改性沥青混合料、SBS/胶粉复合改性沥青混合料劲度模量依次呈下降趋势,沥青混合料韧性逐步得到改善。

由图3(e)、(d)可知:3种沥青混合料的冻融劈裂比接近。胶粉改性沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度比较另两种混合料低,其主要原因为胶粉改性沥青混合料要求矿料级配有更大空间供胶粉填充,而浸水马歇尔试验注重于检验水能否进入混合料内部来考察混合料的水稳定性,因此胶粉改性沥青混合料的水稳定性略差。

由图3(f)可知:胶粉改性沥青混合料、SBS改性沥青混合料、SBS/胶粉复合改性沥青混合料疲劳寿命分别为138 665、130 499、66 468次,胶粉改性沥青混合料的数据离散性最大,其抗疲劳性能不稳定。三者的均值依次为193 578、328 801、369 833次,胶粉改性沥青混合料的抗疲劳性能较其他二者差,SBS改性沥青混合料的疲劳寿命略低于复合改性沥青混合料。

综上所述:SBS与胶粉优势互补有效地提高了沥青混合料的路用性能,具体表现为,SBS/胶粉复合改性沥青混合料较其余两种沥青混合料的高温性能及疲劳寿命有所提升,低温性能明显改善,综合性能优异。

## 5 展望

近年来SBS/胶粉复合改性沥青混合料应用于实际工程中时,沥青储存稳定性较差,无法长时间储存或运输等问题突显,复合改性沥青及其混合料的储存稳定性亟需进一步改善。此外,目前关于SBS/胶粉复合改性沥青混合料的相关研究主要集中于前期路用性能,关于后期应用过程中的长期性能监测与演变少有研究,后续可在此方面进行深入探索。

## 6 结论

(1) 梳理并对比了SBS/胶粉复合改性沥青混合料的干、湿法工艺参数,结果显示:湿法工艺较干法废胎胶粉用量降低1.5%左右(占混合料质量),耗能更高(拌和温度高5~15℃),但胶粉与沥青反应充分、改性效果更稳定,湿法工艺应用更广。

(2) 梳理分析中国SBS/胶粉复合改性沥青混合料级配可知,复合改性沥青混合料常采用AC-13级配,考虑胶粉溶胀特点建议4.75 mm筛孔通过率控制为38%~50%,2.36 mm筛孔通过率控制为27%~37%,0.075 mm筛孔通过率控制为5%~6%。

(3) 对比3种改性沥青混合料路用性能可知,SBS/胶粉复合改性沥青混合料综合性能最优,SBS改性沥青混合料次之,胶粉改性沥青混合料较差,SBS/胶粉复合改性沥青混合料动稳定度、弯曲破坏应变、疲劳寿命(应变400  $\mu\epsilon$ )均值分别可达6 504次/mm、4 610.9  $\mu\epsilon$ 、369 833次,具有胶粉、SBS性能互补趋势。

### 参考文献:

- [1] 王新岐,张廉,王朝辉,等.绿色公路评估指标体系研究[J].筑路机械与施工机械化,2016(11).
- [2] Mario Manosalvas - Paredesa, Juan Gallegoa, Leticia Saizb, et al. Rubber Modified Binders as an Alternative to Cellulose Fiber - SBS Polymers in Stone Matrix Asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 727 - 732.
- [3] Qian C, Fan W, Yang G, et al. Influence of Crumb Rubber Particle Size and SBS Structure on Properties of CR/SBS Composite Modified Asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117 - 157.
- [4] Vignali V, Mazzotta F, Sangiorgi C, et al. Incorporation of Rubber Powder as Filler in a New Dry - Hybrid Technology: Rheological and 3D DEM Mastic Performances Evaluation [J]. Materials, 2016, 9(10).
- [5] Cheng Y, Chai C, Liang C, et al. Mechanical Performance of Warm - Mixed Porous Asphalt Mixture with Steel Slag and Crumb - Rubber - SBS Modified Bitumen for Seasonal Frozen Regions [J]. Materials, 2019, 12(6).
- [6] 刘勇. SBS/胶粉复合改性沥青机理与性能评价研究[D].东南大学硕士学位论文,2018.
- [7] 熊伟,王宏. TB(Terminal Blend)胶粉与SBS复合改性沥青混合料性能及改性机理[J].公路,2017(2).

- [8] 杨光. 季冻区工厂化废橡胶粉/SBS 复合改性沥青(CR/SBSCMA)及混合料性能研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2016.
- [9] 周政. 宣曲高速直投式胶粉与 SBS 复合改性沥青混合料级配设计[J]. 公路, 2018(10).
- [10] 褚付克, 王笑风, 郝孟辉, 等. 利用 I 法和贝雷法对间断级配废胎胶粉复合改性沥青混合料 WRAC-13 的优化设计[J]. 公路, 2017(5).
- [11] 刘博. 存储条件对橡胶沥青及其混合料路用性能影响的研究[D]. 东北林业大学硕士学位论文, 2016.
- [12] 赵屹峰. 大掺量橡胶沥青混合料研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2013.
- [13] 吴中华. 橡胶粉改性沥青及混合料路用性能研究[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2013.
- [14] 雷敏. 橡胶改性剂对沥青及其混合料性能影响研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2014.
- [15] 王道锋. 橡胶沥青的生产工艺及关键设备研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2010.
- [16] 镇方宇. 橡胶沥青混合料路用性能与施工工艺的研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2014.
- [17] 刘贞鹏. SBS/橡胶复合改性沥青混合料高温性能研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2014.
- [18] 张何, 曹国振, 田连民, 等. 橡胶粉 SBS 复合改性沥青混合料配合比设计[J]. 公路, 2016(6).
- [19] 刘延军. 废胶粉与 SBS 复合改性沥青黏弹体系及其路用性能研究[D]. 中国石油大学(华东)博士学位论文, 2017.
- [20] 王伟明, 凌宏杰. SBS 复合改性乳化沥青研制及其性能研究[J]. 中外公路, 2020(4).
- [21] 杨光, 申爱琴, 陈志国, 等. 季冻区橡胶粉与 SBS 复合改性沥青混合料性能及改性机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015(6).
- [22] 胡毅, 陈虹宇, 翟全磊, 等. 季冻区橡胶改性沥青性能研究[J]. 施工技术, 2019(23).
- [23] 郭金星, 张书华. 沥青种类对 SMA-13 级配的影响[J]. 公路交通科技, 2018(9).
- [24] 张何, 曹国振, 田连民, 等. 橡胶粉 SBS 复合改性沥青混合料配合比设计[J]. 公路, 2016(6).
- [25] 陆如洋, 肖鹏, 姚明部, 等. 胶粉复合改性沥青混合料疲劳性能试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017(S2).
- [26] 黄卫东, 吕泉, 柴冲冲. TB+SBS 复合改性沥青的性能[J]. 建筑材料学报, 2016(3).
- [27] 杨倡珍, 张允宝. 老化 CR/SBS 复合改性沥青混合料弯曲疲劳特性试验研究[J]. 中外公路, 2020(4).
- [28] 黄卫东, 郑茂, 黄明. 溶解性胶粉改性沥青混合料疲劳性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014(10).
- [29] 陈中秋. 高聚熟化胶粉与 SBS 复合改性沥青混合料在宣曲高速公路的应用研究[J]. 公路, 2018(10).
- [30] 杨光, 申爱琴, 陈志国, 等. 废旧橡胶粉与 SBS 复合改性沥青混合料路用性能及应用技术[J]. 公路交通科技, 2016(4).
- [31] 黄卫东, 钟皓白, 李本亮, 等. 不同疲劳试验中改性沥青混合料疲劳性能对比[J]. 建筑材料学报, 2019(1).
- [32] 张海涛, 高丹丹, 刘强强. 基于 PG 的复合改性沥青混合料性能的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018(14).
- [33] 蔡键. 胶粉/SBS 复合改性沥青路用性能研究[J]. 山东化工, 2016(7).
- [34] 费豪斌. 胶粉与 SBS 复合改性沥青混合料的试验及应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(7).
- [35] 邹进忠, 范春华, 彭斌, 等. CR/SBS 复合改性沥青优化性能研究[J]. 交通科技, 2017(4).
- [36] 李关龙, 王枫, 匡民明, 等. SBS/废胶粉复合改性沥青的性能[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2016(1).
- [37] 刘朝晖, 柳力, 史进, 等. SBS/胶粉复合改性沥青制备工艺及路用性能[J]. 中国科技论文, 2012(11).
- [38] 黄卫东, 吕泉, 柴冲冲. Terminal Blend 胶粉改性沥青的复合改性研究[J]. 建筑材料学报, 2016(1).
- [39] 肖鹏, 徐亚, 陆如洋, 等. 不同温度与荷载作用下的胶粉复合改性沥青混合料抗车辙性能试验研究[J]. 施工技术, 2015(S2).
- [40] 李淑萍, 李亚飞, 陈景, 等. 胶粉与 RET 复合 SBS 改性沥青老化前后流变特性及其混合料性能研究[J]. 公路工程, 2017(3).
- [41] 黄卫东, 郑茂, 黄明. 多种沥青混合料疲劳性能的比较[J]. 建筑材料学报, 2015(6).
- [42] 包建业. 胶粉对 SBS 改性沥青流变特性及微观结构的影响[J]. 中外公路, 2019(3).
- [43] 吉泽中, 刘嘉伟, 徐凯. 橡胶/SBS 复合改性沥青及其混合料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2018(4).
- [44] 郭浩然. SBS/橡胶复合改性沥青性能研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2018.