

稳定型废旧胶粉改性沥青混合料开发及工业化生产关键技术研究

罗志宝 高 仲 田 小 高志平

鄂尔多斯市路泰新材料科技发展有限公司 内蒙古鄂尔多斯 017000

摘要: 橡胶沥青作为一种环保型的路面材料,在近年来得到广泛应用。为了提高传橡胶沥青的高温稳定性和低温延展性,将废旧胶粉、SBS改性剂和道路石油沥青进行复合改性。以辽河90号A级道路石油沥青为基质沥青,加入增塑剂、橡胶粉、SBS制备复合改性沥青。通过正交试验考察增塑剂、废旧橡胶粉、搅拌剪切温度、搅拌时间对胶粉改性沥青性能的影响。由正交试验得到橡胶沥青的最优方案为:增塑剂6%、橡胶粉15%、90A沥青79%、外掺稳定剂0.2%,剪切搅拌温度160℃,发育温度180℃,发育时间2h。在最优方案下制得橡胶沥青的软化点为53.5℃、25℃针入度为95.8(0.1mm)、5℃延度为287mm、弹性恢复97%。在橡胶沥青最佳方案下分别以2.0%、2.3%、2.6%、2.9%、3.2%外掺SBS改性剂进行复合改性。经检测确定胶粉SBS复合改性沥青的最佳配方为增塑剂6%、橡胶粉15%、90A沥青79%、外掺SBS2.6%、外掺稳定剂0.2%,剪切搅拌温度160℃,发育温度180℃,发育时间4h。在最优方案下制得胶粉SBS复合改性沥青的软化点为82.9℃、25℃针入度为58.5(0.1mm)、5℃延度为334mm、弹性恢复98%。与5%SBS改性沥青、15%胶粉改性沥青相比,稳定型胶粉SBS复合改性沥青有更高的高低温性能和抗老化性能。稳定型胶粉SBS复合改性沥青混合料的车辙动稳定度为8688次/mm,-10℃低温弯

曲应变为4229 $\mu\epsilon$,浸水马歇尔残留稳定度比和浆融劈裂强度比均大于90%。与SBS改性沥青混合料相比,稳定型胶粉SBS复合改性沥青混合料其的高温、低温性能、水稳定性明显的提高。稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青在高温及低温条件下有较好的力学性质,同时应用在寒冷或严寒地区,可提高混合料的高温稳定性,也可改善低温柔韧性,在施工中,应严格控制施工温度、改性沥青存储工艺及混合料的搅拌等关键性技术,以及保证施工质量。

关键词: 道路工程; 应用技术; 低温性能; 力学性能

Research on Key Technology of Development and Industrial Production of Stabilized Waste Rubber Powder Modified Asphalt Mixture

Zhibao Luo, Zhong Gao, Xiao Tian, Zhiping Gao

Erdos Lutai New Material Technology Development Co., LTD. Erdos 017000, Inner Mongolia

Abstract: Rubber asphalt, as an environmentally friendly pavement material, has been widely used in recent years. In order to improve the high temperature stability and low temperature ductility of rubber transfer asphalt, waste rubber powder, SBS modifier and road petroleum asphalt were modified. Liaohe 90 Grade A road asphalt as the base asphalt, adding plasticizer, rubber powder, SBS to prepare composite modified asphalt. The effects of plasticizer, waste rubber powder, stirring shear temperature and stirring time on the properties of rubber powder modified asphalt were investigated by orthogonal test. The optimal scheme of rubber asphalt obtained by orthogonal test is as follows: plasticizer 6%, rubber powder 15%, 90A asphalt 79%, additive stabilizer 0.2%, shear stirring temperature 160℃, development temperature 180℃, development time 2h. Under the optimal scheme, the softening point of rubber asphalt prepared is 53.5℃, the penetration degree is 95.8(0.1mm) at 25℃, the elongation is 287mm at 5℃, and the elastic recovery is 97%. The rubber asphalt was modified with SBS modifier of 2.0%, 2.3%, 2.6%, 2.9% and 3.2%, respectively. The optimum formula of SBS composite modified asphalt was determined as plasticizer 6%, rubber powder 15%, 90A asphalt 79%, mixed SBS2.6%, mixed stabilizer 0.2%. The shear stirring temperature was 160℃, the development temperature was 180℃, and the development time was 4h. Under the optimal scheme, the softening point of SBS composite modified asphalt is 82.9℃, the penetration degree is 58.5(0.1mm) at 25℃, the elongation is 334mm at 5℃, and the elasticity recovery is 98%. Compared with 5%SBS modified asphalt and 15% rubber powder modified asphalt, the stable rubber powder SBS composite modified asphalt has higher high and low temperature

properties and anti-aging properties. The rutting stability of the stabilized rubber powder SBS composite modified asphalt mixture is 8688 times /mm, and the bending should be 4229 $\mu\epsilon$ when bending at -10°C. The Marshall residual stability ratio and the slurry melting splitting strength ratio are both greater than 90%.

Compared with SBS modified asphalt mixture, the high temperature, low temperature properties and water stability of stabilized rubber powder SBS modified asphalt mixture are significantly improved. Stable waste rubber powder SBS composite modified asphalt has good mechanical properties under high temperature and low temperature conditions, while applied in cold or cold areas, can improve the high temperature stability of warm compound, but also improve the low temperature flexibility, in the construction, should strictly control the construction temperature, modified asphalt storage technology and mixing of key technologies, as well as ensure the quality of construction.

Keywords: Road engineering; Application technology; Low temperature performance; Mechanical property
科技计划项目：鄂尔多斯市科技重大专项项目（2022EEDSKJZDZX013, 2022EEDSKJZDZX013-01）。

近年来，我国经济快速发展，人民生活水平不断提高，公路交通量迅速增加。汽车产业的不断发展给人们的日常生活带来了极大便利，但作为副产品的废旧橡胶轮胎大量堆积，导致极大的资源浪费。如何有效处理每年产生的大量废旧轮胎是我们亟待解决的问题。

根据相关研究表明，把废旧轮胎剪切成粉末，作为改性剂加入到基质沥青中。可以提高沥青的性能。而且在固废利用、环境保护方面也起到了一定积极作用。相关研究和工程实践表明^[1-3]，橡胶沥青具有高黏、高弹、温度敏感性低的特性，废轮胎胶粉可以有效提高沥青混合料的高低温性能、抗疲劳性能、抗车辙和抗水损害能力，延长路面使用寿命。有利于节约资源，采用橡胶沥青是有效解决沥青路面早期病害发生的有效途径，也能够降低建设后期养护成本。

橡胶沥青混合料施工实践证明：橡胶粉单一改性沥青中胶粉参杂数量比较大，可以增大沥青粘度，但橡胶沥青贮存稳定性差、需再现生产现用，混合料拌和时间延长。本文主要考虑SBS和废旧橡胶粉的相关特点，进一步的研究废旧胶粉SBS复合改性沥青及混合料的路用的性能，在制备过程中采用燃气炉导热油加热基质沥青+换热器瞬间升温+改性沥青设备研磨剪切+电捕焦油、活性炭吸附、筒式喷淋塔进行有害气体处理。特定的工艺制备复合改性沥青，包含相关的高温性能以及低温性能以及各种的力学性能，并对稳定型胶粉SBS复合改性沥青及混合料的性能进行相关研究并铺筑试验路。

1 原材料优选

1.1 基质沥青

基质沥青采用中国石油辽河石化分公司AH-90#石油沥青，主要技术指标见表1，各项指标符合《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40-2004）中道路石油沥青A级技术要求。

表1 辽河90#基质沥青性能指标

| 性能指标 | 辽河90# | 技术指标 |
|-----------------|-------|--------|
| 针入度（25，100g，5s） | 90 | 80-100 |
| 软化点（环球法） | 44.5 | ≥44 |

| | | |
|----------|------|------|
| 15℃延度 | >150 | ≥100 |
| 残留针入度比% | 59.6 | >57 |
| 质量损失% | -0.2 | ±0.8 |
| 残留度（10℃） | 8.9 | >8 |

1.2 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物SBS

苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物SBS由中石化巴林石化分公司、燕山石化橡塑化工有限责任公司生产，巴林石化线型SBS改性剂型号为YH-791（SBS1301），嵌段比30/70，非充油，相对分子量9-10万。主要技术指标如表2所示。燕山石化星型SBS改性剂型号为4303，嵌段比40/60，非充油，相对分子量10-12万。主要技术指标如表3所示。

表2 YH-791SBS主要性能指标

| 技术指标 | 检测结果 | 标准要求 |
|-------------------------------|------|-----------|
| 灰分% | 0.10 | ≤0.2 |
| 挥发分% | 0.16 | ≤1.0 |
| 质量流动速率G*(10min) ⁻¹ | 0.11 | 0.01-0.50 |
| 拉伸强度MPa | 21.2 | >18 |
| 扯断伸长率% | 752 | <700 |
| 扯断永久变形% | 20 | <40 |
| 绍尔A硬度 | 72 | >68 |
| 300%定伸应力mpa | 2.4 | >2.0 |
| 结合苯乙烯% | 28.8 | 28.0-32.0 |

表3 4303 SBS主要性能指标

| 技术指标 | 检测结果 | 标准要求 |
|-------------------------------|------|-----------|
| 灰分% | 0.20 | ≤0.2 |
| 挥发分% | 0.70 | ≤1.0 |
| 质量流动速率G*(10min) ⁻¹ | 0.17 | 0.01-0.50 |
| 拉伸强度MPa | 11.2 | >8 |
| 扯断伸长率% | 569 | <700 |
| 扯断永久变形% | 31 | <40 |
| 绍尔A硬度 | 76 | >68 |
| 300%定伸应力mpa | 2.6 | >2.0 |
| 结合苯乙烯% | 29.4 | 28.0-32.0 |

1.3 废旧橡胶粉

橡胶粉采用鄂尔多斯市建立橡胶厂的生产的60目废旧子午轮胎胶粉，主要主要技术指标见表4。

表4 60目胶粉主要技术指标

| 序号 | 检测项目% | 检测指标 | 标准要求 |
|----|-------|------|-------|
| 1 | 加热减量 | 0.34 | <1.0 |
| 2 | 灰分 | 2.6 | <8 |
| 3 | 丙酮抽出物 | 3.7 | <10 |
| 4 | 炭黑含量 | 29.8 | ≥26 |
| 5 | 纤维含量 | 0.38 | <0.5 |
| 6 | 金属物含量 | 0.02 | <0.08 |
| 7 | 橡胶含量 | 63.6 | ≥42 |

1.4 增塑剂

增塑剂采用山东孚润达化工有限公司生产的橡胶油，其技术指标见表5。

表5 增塑剂主要技术指标

| 序号 | 项目 | 单位 | 要求范围 | 检测结果 |
|----|------|-------------------------|-------|------|
| 1 | 运动粘度 | 100℃ mm ² /s | 20-30 | 23 |
| 2 | 开口闪点 | ℃ | ≥200 | 210 |
| 3 | 密度 | 20℃ kg/m ³ | 1-1.1 | 1.08 |
| 4 | 水分 | % | 无 | 无 |
| 5 | 芳烃含量 | % | ≥80 | 85 |
| 6 | 外观 | — | 目测 | 黄绿色 |

1.5 稳定剂

稳定剂采用氯化钙，技术指标见表6。

表6 氯化钙主要技术指标

| 序号 | 项目 | 单位 | 要求范围 | 检测结果 |
|----|----------|----|-------|------|
| 1 | 氯化钙 | % | ≥90 | 93 |
| 2 | 镁及碱金属氯化物 | % | ≤5.0 | 3.2 |
| 3 | 水不溶物 | % | ≤0.25 | 0.18 |
| 4 | 碱度 | % | ≤0.25 | 0.16 |
| 5 | 硫酸盐 | % | ≤0.3 | 0.15 |

2 橡胶沥青及稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青的制备以及相关指标

2.1 生产制备工艺

根据胶粉改性沥青、SBS改性沥青的特点。以正交试验对胶粉改性沥青进行制备及技术指标检测，确定最佳配方。综合考虑到橡胶粉的掺量与经济性成正比，因此采用较大的橡胶粉掺量，分别以橡胶粉掺量10%、15%、20%、25%，增塑剂掺量4%、6%、8%、10%、结合考虑剪切温度、剪切时间和发育时间，确定橡胶沥青的最优配方。为进一步提高胶粉改性沥青的路用性能，综合考虑改性沥青的生产成本，在最优配方下分别加入2.0%、2.3%、2.6%、2.9%、3.2%外掺SBS改性剂进行复合改性。确定稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青的最优配方。

稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青的生产过程中，既要保证基质沥青达到一定温度，又要防止基质沥青的长时间高温导致沥青老化。因此基质沥青在高温罐中加热不宜超过150℃，通过输油管道换热器瞬间升温至200℃，在进入改性设备时，同步加入橡胶粉、SBS改性剂、增塑剂在175℃~180℃进行研磨剪切，然后通过输油管道输入发育罐，加入稳定剂，在190℃下搅拌发育4h。生产过程中采用电捕焦油、活性炭吸附、碱式喷淋塔进行有害气体及粉尘处理。

2.2 室内正交试验

参照JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》、JT/T 798-2019《路用废胎胶粉橡胶沥青》对胶粉改性沥青进行正交试验，其性能指标见表7。

表7 正交试验结果

| 增塑剂 (%) | 橡胶粉 (%) | 剪切温度 (℃) | 剪切时间 (min) | 发育时间 (h) | 软化点 (℃) | 25℃针入度 (mm) | 5℃延度 (cm) |
|---------|---------|----------|------------|----------|---------|-------------|-------------------|
| 0 | 20 | 160 | 40 | 4 | 53.7 | 61.1 | 20.9 |
| 2 | 10 | 160 | 40 | 4 | 52.2 | 61.5 | 18.6 |
| 2 | 15 | 160 | 40 | 4 | 55.5 | 67.0 | 22.2 |
| 2 | 20 | 180 | 40 | 4 | 57.2 | 78.2 | 26.7 |
| 2 | 25 | 180 | 40 | 4 | 58.7 | 82.1 | 28.8 |
| 4 | 10 | 160 | 30 | 4 | 49.4 | 73.7 | 19.1 |
| 4 | 15 | 180 | 45 | 4 | 50.2 | 94.2 | 28.4 |
| 4 | 20 | 190 | 75 | 4 | 53.6 | 88.1 | 28.9 |
| 4 | 25 | 240 | 75 | 4 | 53.2 | 85.6 | 20.2 |
| 6 | 10 | 150 | 30 | 4 | 48.3 | 88.4 | 20.9 |
| 6 | 15 | 160 | 45 | 4 | 53.5 | 95.8 | 28.7 |
| 6 | 20 | 190 | 60 | 4 | 57.2 | 84.8 | 21.4 |
| 6 | 25 | 210 | 75 | 4 | 49.5 | 113.2 | 40.5 |
| 8 | 10 | 140 | 30 | 4 | 45.8 | 94.6 | 30.2 |
| 8 | 15 | 160 | 45 | 4 | 51.6 | 87.8 | 26.3 |
| 8 | 20 | 180 | 60 | 4 | 57.6 | 99.7 | 21.7 |
| 8 | 25 | 200 | 75 | 4 | 48.9 | 127.6 | 39.2 ₂ |
| 10 | 10 | 130 | 30 | 4 | 47.3 | 72.5 | 24.5 |
| 10 | 15 | 140 | 45 | 4 | 50.3 | 61.6 | 20.2 |
| 10 | 20 | 160 | 60 | 4 | 45.9 | 164.3 | 40.0 |
| 10 | 25 | 200 | 75 | 4 | 47.4 | 169.6 | 43.1 |

在试验指标符合技术规范要求的基础上加以考虑经济适用，最终确定橡胶粉改性沥青的最佳配方为：增塑剂6%、橡胶粉15%、90#沥青79%、外掺稳定剂0.2%。在此配比的基础上综合考虑稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青的高低温性能、施工和易性及工程经济性，在不同的试验节点中分别加入2.0%、2.3%、2.6%、2.9%、3.2%外掺SBS改性剂、0.2%

的稳定剂进行复合改性。掺加1301 SBS改性剂的复合改性沥青性能指标见表8，掺加4303 SBS改性剂的复合改性沥青性能指标见表9。

表8 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青试验结果（掺1301 SBS改性剂）

| SBS (%) | 橡胶粉 (%) | 增塑剂 (%) | 软化点 (°C) | 25°C 针入度 (mm) | 5°C 延度 (cm) | 弹性恢复率 (%) | 135°C 黏度 (Pa·s) | 软化点离析差 (°C) |
|---------|---------|---------|----------|---------------|-------------|-----------|-----------------|-------------|
| 2.0 | 15 | 6 | 54.8 | 69.4 | 24.3 | 94 | 2.8 | 2.2 |
| 2.3 | 15 | 6 | 56.1 | 67.4 | 21.5 | 95 | 2.9 | 2.0 |
| 2.6 | 15 | 6 | 77.4 | 60.7 | 31.8 | 96 | 3.0 | 1.7 |
| 2.9 | 15 | 6 | 81.0 | 60.2 | 31.0 | 97 | 3.0 | 1.5 |
| 3.2 | 15 | 6 | 85.5 | 57.1 | 30.4 | 98 | 3.1 | 1.3 |

表9 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青试验结果（掺4303 SBS改性剂）

| SBS (%) | 橡胶粉 (%) | 增塑剂 (%) | 软化点 (°C) | 25°C 针入度 (mm) | 5°C 延度 (cm) | 弹性恢复率 (%) | 135°C 黏度 (Pa·s) | 软化点离析差 (°C) |
|---------|---------|---------|----------|---------------|-------------|-----------|-----------------|-------------|
| 2.0 | 15 | 6 | 63.2 | 64.8 | 20.7 | 95 | 2.9 | 2.1 |
| 2.3 | 15 | 6 | 79.7 | 57.5 | 22.5 | 96 | 3.0 | 1.7 |
| 2.6 | 15 | 6 | 82.9 | 58.5 | 33.4 | 98 | 3.1 | 1.5 |
| 2.9 | 15 | 6 | 88.2 | 58.7 | 33.1 | 98 | 3.2 | 1.4 |
| 3.2 | 15 | 6 | 95.9 | 59.3 | 32.8 | 99 | 3.2 | 1.2 |

由表8、表9可见：稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青的软化点随着SBS改性剂掺量的增大而增加，延度随着SBS改性剂掺量的先增大后减小，软化点离析差随着SBS改性剂掺量的增大而减小。稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青的性能随着SBS改性剂与废旧橡胶粉的掺量发生变化，黏度、软化点、5°C延度较为显著。

综合考虑稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青的高低温性能、运输贮存性能、施工和易性及工程经济性，最终选定最优稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青配方及生产工艺为增塑剂6%、橡胶粉15%、90A沥青79%、外掺4303 SBS改性剂2.6%、外掺稳定剂0.2%，剪切搅拌温度160°C，发育温度180°C，发育时间4h。并对其指标验证结果如表10所示。

表10 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青常规指标

| 技术指标 | 检测结果 |
|----------------------|------|
| 软化点/°C | 82.9 |
| 针入度 (25°C, 100g, 5s) | 58.5 |
| 延度 (5°C, cm) | 33.4 |
| 粘度135°C (Pa·S) | 3.1 |
| 弹性恢复25°C | 97 |
| 软化点差 | 1.5 |
| RTFOT | |

| | |
|------------|--------|
| 质量变化 (%) | -0.524 |
| 残留针入度比 (%) | 64 |
| 延度 (5°C) | 20.2 |

2.3 借助荧光显微镜分析沥青内部结构

图1所示为荧光显微镜下稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青结构图，从图中可以看出，整个沥青体系界面以三维网络状的形式呈现出来，使得该体系趋向稳定性结构。

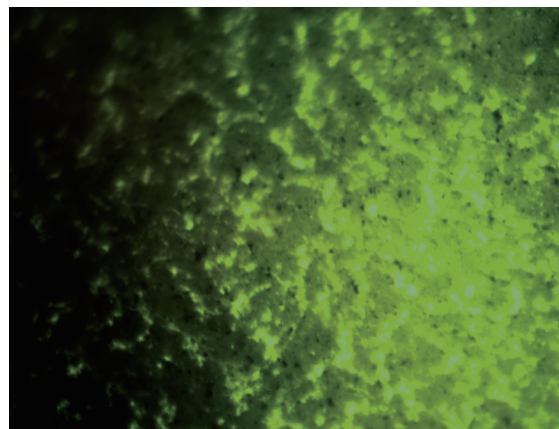


图1 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青荧光显微镜结构图

结合荧光显微镜在微观结构图中的状态，我们模拟提出了稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青在制配过程模型，如图2所示，在高速剪切的作用下将SBS改性剂、废旧橡胶粉均匀的分散到增塑剂和基质沥青当中，其中废旧橡胶粉与加固了原本SBS三维网络结构，形成更为完善的网络结构。

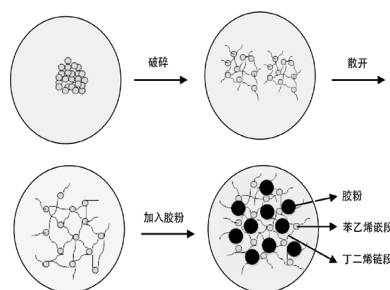


图2 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合制配过程模拟图

3 混合料性能验证

3.1 级配类型结构选择

主要核心为沥青混合料相关结构的强度，要得到相关性能优良的沥青混合料必须具备以下两个条件。

(1) 主骨架进行充分的镶嵌，进一步形成相关骨架。

(2) 沥青相关的胶浆应该具备比较大粘度，而且需要不断充分填充相关的主骨架空隙，使得相关混合料密实。

对于稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合料的设计而言，主要核心就是解决级配问题，国外很多学者认为橡胶沥青粘度比较大，且内部存在很多橡胶粒子，所以从宏观状态对于沥青混合中的这种挤压状态，使得我们在混合料设计中，需要尽可能减少细粒用量，进一步增大矿料间隙，为稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合料提供更大填充空间，避免造成一定嵌套以及各种干涉作用，为此为国

外橡胶粉改性沥青混合料主要采用间断级配的骨架密实结构^[4-7]。

本文选择SMA-16、AC-16进行相关混合料设计，采用内蒙古包头固阳集料进行掺配，SMA-16混合料矿料合成级配、AC-16混合料矿料合成级配结果如表11、表12所示。

3.2 改性沥青混合料马歇尔试验

考虑到稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青黏度较高的问题，因此，在稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合料的拌合、碾压等温度都需要进行适当的调整，室内集料温度控制在180℃，稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青加热至170℃

，试件成型温度175℃，按照JTG F40-2004规范要求设计方法试验流程确定SBS改性沥青、橡胶粉改性沥青、稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合料的最佳沥青用量(OAC)、空隙率(VV)、矿料空隙率(VMA)、饱和度(VFA)、马歇尔稳定度(MS)试验结果比较见表13。

由表13可知，稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合料相较于SBS改性沥青、橡胶粉改性沥青混合料在最佳油石比时，混合料的马歇尔技术指标皆有不同程度的变化。稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青中采用大量的废旧胶粉代替部分的基质沥青、SBS改性剂，混合料性能更优，且相同条件

表11 SMA-16混合料矿料合成级配

| 材料名称 | 比例(%) | SMA-16混合料矿料合成级配 | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| | | 19 | 16.0 | 13.2 | 9.50 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| 9.5-19 | 34 | 34.0 | 29.5 | 9.5 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 4.75-9.5 | 32 | 32.0 | 32.0 | 31.2 | 27.9 | 3.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2.36-4.75 | 10 | 10.0 | 10.0 | 9.7 | 8.7 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 石屑 | 12 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 11.0 | 7.2 | 4.2 | 2.4 | 1.0 | 0.6 | 0.1 |
| 矿粉 | 12 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 11.9 | 11.4 | 9.2 |
| 合成级配各筛孔通过率 | 100 | 95.5 | 74.4 | 61.0 | 27.0 | 19.3 | 16.3 | 14.4 | 13.0 | 12.1 | 9.4 | |
| 级配范围通过率 | 100 | 90-100 | 65-85 | 45-65 | 20-32 | 15-24 | 14-22 | 12-18 | 10-15 | 9-14 | 8-12 | |

表12 AC-16混合料矿料合成级配

| 材料名称 | 比例(%) | AC-16混合料矿料合成级配 | | | | | | | | | | |
|------------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| | | 19 | 16.0 | 13.2 | 9.50 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| 9.5-19 | 21 | 21.0 | 18.2 | 5.8 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 4.75-9.5 | 41 | 41.0 | 41.0 | 39.9 | 35.8 | 3.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 石屑 | 32 | 32.0 | 32.0 | 32.0 | 32.0 | 29.4 | 19.3 | 11.3 | 6.4 | 2.8 | 1.7 | 0.4 |
| 矿粉 | 6 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 5.7 | 4.6 |
| 合成级配各筛孔通过率 | 100 | 97.2 | 83.8 | 74.0 | 39.3 | 25.4 | 17.3 | 12.4 | 8.8 | 7.4 | 5.0 | |
| 级配范围通过率 | 100 | 90-100 | 76-92 | 60-80 | 34-62 | 20-48 | 13-36 | 9-26 | 7-18 | 5-14 | 4-8 | |

表13 改性沥青混合料马歇尔试验结果

| 序号 | 改性沥青类型 | 级配类型 | OAC(%) | VV(%) | VMA(%) | VFA(%) | MS(KN) | FL(0.1mm) |
|----|--------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-----------|
| 1 | SBS 改性沥青 | AC-16 | 4.8 | 4.3 | 14.1 | 68.0 | 10.8 | 3.0 |
| 2 | | SMA-16 | 6.1 | 3.8 | 17.3 | 77.5 | 15.2 | 3.3 |
| 3 | 橡胶粉 改性沥青 | AC-16 | 4.9 | 4.2 | 14.2 | 68.3 | 9.6 | 3.2 |
| 4 | | SMA-16 | 6.2 | 3.7 | 17.2 | 78.2 | 14.8 | 3.5 |
| 5 | 稳定型废旧 胶粉SBS复合 改性沥青 | AC-16 | 4.9 | 4.1 | 14.3 | 68.6 | 12.4 | 3.4 |
| 6 | | SMA-16 | 6.2 | 3.6 | 17.2 | 78.6 | 16.1 | 3.8 |

下经济优势更加显著明显。

3.3 改性沥青混合料高低温稳定性

按照JTG E20-2011中T0919-2011、T0715-2011测试改性沥青混合料的高低温稳定性，结果见表14。

表14 改性沥青混合料的高低温稳定性试验结果

| 序号 | 改性沥青类型 | 高温性能 | | 低温性能 | |
|----|------------------------|----------|---------|----------|----------------------|
| | | 动稳定度次/mm | 车辙变形量mm | 抗弯拉强度mpa | 最大弯拉应变 $\mu\epsilon$ |
| 1 | SBS改性沥青 AC16 | 4420 | 1.3687 | 15.71 | 3055.5 |
| 2 | SBS改性沥青 SMA16 | 7765 | 1.1583 | 17.93 | 3199.86 |
| 3 | 橡胶粉改性沥青 AC16 | 4698 | 1.1364 | 18.04 | 3352.8 |
| 4 | 橡胶粉改性沥青 SMA16 | 7821 | 1.0082 | 18.97 | 3804.27 |
| 5 | 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青 AC16 | 5121 | 0.8655 | 20.78 | 3768.84 |
| 6 | 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青 SMA16 | 8688 | 0.7675 | 21.49 | 4229.19 |

相较于SBS改性沥青混合料和橡胶粉改性沥青混合料，稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合料的动稳定度提高了9~16%，车辙变形量减小了0.2~0.5mm。试验表明稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合料比SBS改性沥青混合料和橡胶粉改性沥青混合料具有更优异的高温稳定性，因此，为应对极端高温条件下沥青路面车辙问题，将SBS与橡胶粉进行复配是有必要的。

6种改性沥青混合料的最大弯曲应变均优于JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》规定的严寒区弯曲应变大于3000 $\mu\epsilon$ 的要求，且稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合料的弯曲应变显著大于单掺SBS或单掺橡胶粉改性沥青混合料。同时，相较于SBS改性沥青混合料和橡胶粉改性沥青混合料，稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合料的最大弯拉应变、断裂应变能分别提升了23~32%。

由此可见，稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青混合料的低温抗裂性能比单掺SBS或单掺橡胶粉改性沥青混合料更为显著。

3.4 改性沥青混合料水稳性能

按照JTG E20-2011中的T0709、T0729进行浸水马歇尔与冻融劈裂强度试验。沥青混合料的水稳定性与冻融劈裂强度试验结果见表15。

表15 改性沥青混合料的水稳定性试验结果

| 序号 | 改性沥青类型 | 水稳定性 | |
|----|--------------|---------------|--------------|
| | | 浸水马歇尔残留稳定度比/% | 冻融劈裂强度比TSR/% |
| 1 | SBS改性沥青 AC16 | 91.5 | 92.4 |

| | | | |
|---|------------------------|------|------|
| 2 | SBS改性沥青 SMA16 | 92.6 | 93.5 |
| 3 | 橡胶粉改性沥青 AC16 | 92.4 | 92.8 |
| 4 | 橡胶粉改性沥青 SMA16 | 93.4 | 96.2 |
| 5 | 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青 AC16 | 95.8 | 95.1 |
| 6 | 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青 SMA16 | 97.2 | 97.4 |

经历1次冻融循环和长时间高温水浴损伤作用后，分析6种改性沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度比和冻融劈裂强度比，稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青更具有优良的水稳定性。

4 结束语

本文主要对于改性沥青、混合料以及路用性质进行系统实验，并在此基础上需要结合实际工程应用对于关键工程技术进行不断的总结，并铺设了试验路，应用情况良好。

(1) 稳定型胶粉SBS复合改性沥青有更高的高低温性能和抗老化性能；

(2) 稳定型胶粉SBS复合改性沥青混合料高温、低温性能、水稳定性明显的提高。

(3) 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青在高温及低温条件下有较好的力学性质，同时应用在寒冷或严寒地区，可提高混合料的高温稳定性，也可改善低温柔韧性。

(4) 稳定型废旧胶粉SBS复合改性沥青在制备过程中宜采用燃气炉导热油加热基质沥青+换热器瞬间升温+改性沥青设备研磨剪切+电捕焦油、活性炭吸附、筒式喷淋塔进行有害气体处理。

参考文献：

- [1] 孙潜. 废橡胶粉改性沥青混合料性能研究[J]. 信息周刊, 2020(4): 2.
- [2] 过震文, 璐利平, 于晓晓, 等. 干法直投胶粉改性沥青混合料的研究和应用进展[J]. 石油沥青, 2020, 34(4): 8.
- [3] 曹支才, 张宏亮. 双螺杆挤出胶粉与RET复合改性沥青及其混合料性能研究[J]. 公路工程, 2020, 45(2): 8.
- [4] 冯新军, 李旺, 张喆. TLA+废胶粉复合改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路与汽运, 2020(6): 4.
- [4] 李自彬. 公路工程胶粉改性沥青路面施工技术研究[J]. 华东科技: 综合, 2021(6): 2.
- [6] 徐琦, 岳光华, 姜帅, 等. 干拌直投式复合胶粉改性沥青混合料应用技术研究[J]. 公路与汽运, 2019(2): 3.
- [7] 陈文生. 稳定型橡胶粉/SBS复合改性沥青的制备及混合料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(10): 5.

作者简介：

罗志宝(1981.10—)，男，内蒙古乌兰察布市人，汉族，主要从事公路养护、新材料技术研究。