

# Study on Classification of Pyrolytic Carbon Black and Its Coupled Product Modified Asphalt PG

Wei Song<sup>1</sup>, Youwei Gan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Communications Design & Research Institute Co., Ltd. of Jiangxi Province, Nanchang Jiangxi

Email: 1939313837@qq.com

Received: Jul. 4<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jul. 22<sup>th</sup>, 2019; published: Jul. 29<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In order to investigate the performance of pyrolysis carbon black (PCB) modified asphalt, the coupled carbon black (referred to as coupled PCB) was prepared by PCB and PCB coupling treatment to prepare modified asphalt and composite modified asphalt. PG grading test, separation test and viscosity test of PCB modified asphalt, coupled PCB modified asphalt and PCB-SBS composite modified asphalt under different dosages were studied. The PCB and coupled PCB content were used to study the matrix asphalt, SBS modified asphalt with high and low temperature performance and storage stability and mixing compaction temperature. The results show that the PG classification is 64-22 when the PCB content in the matrix asphalt is from 0% to 25%; the PG classification is 70-22 when the PCB content in the SBS modified asphalt is from 0% to 20%. When the amount is 25%, the PG grade reaches 76-22; the storage stability of the PCB modified asphalt is significantly improved compared with the PCB, but the PG grade is unchanged. It is recommended that the amount of pyrolytic carbon black is not more than 15% in the matrix asphalt, 10% in the SBS modified asphalt, and 15% in the coupled PCB.

## Keywords

Road Engineering, PCB, Modified Asphalt, Coupling, SBS

---

# 热解炭黑及其偶联产物改性沥青PG分级研究

宋 伟<sup>1</sup>, 甘有为<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南 长沙

<sup>2</sup>江西省交通设计研究院有限公司, 江西 南昌

Email: 1939313837@qq.com

文章引用: 宋伟, 甘有为. 热解炭黑及其偶联产物改性沥青 PG 分级研究[J]. 交通技术, 2019, 8(4): 271-280.

DOI: 10.12677/ojtt.2019.84033

## 摘要

为探讨热解炭黑(PCB)改性沥青的性能,以PCB、及对PCB进行偶联处理制备偶联炭黑(简称偶联PCB)为研究对象,制备改性沥青及复合改性沥青。试验通过不同掺量下PCB改性沥青、偶联PCB改性沥青、PCB-SBS复合改性沥青的PG分级试验、离析试验和黏度试验,研究了PCB、偶联PCB掺量对基质沥青、SBS改性沥青高低温性能、贮存稳定性、拌和温度与压实温度的影响。研究表明:基质沥青中PCB掺量从0%至25%时PG分级都为64-22;SBS改性沥青中PCB掺量从0%至20%时PG分级都为70-22,在掺量为25%时PG分级达到76-22;偶联PCB相比PCB改性沥青贮存稳定性显著提升,但PG分级无变化。建议热解炭黑在基质沥青中掺量不超过15%,在SBS改性沥青中掺量为10%;偶联PCB掺量为15%。

## 关键词

道路工程, PCB, 改性沥青, 偶联, SBS

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

2016年全国废旧轮胎产生量在3亿条左右,且每年产生的废旧轮胎正在以8%~10%的速度急剧增加。到2020年,我国废旧轮胎数量将达2000万吨[1]。废旧轮胎综合利用途径主要包括翻新、再生橡胶、橡胶粉、热解等,其中废旧轮胎微负压热解技术,实现了废旧轮胎100%环境无害化回收再利用,其主要产物是热解炭黑[2]。

研究表明,工业炭黑作为沥青外掺剂在掺量为10%~15%时显著改善原有沥青的温度敏感性与抗磨耗性[3]。热解炭黑价格约为工业炭黑的1/4,为其用于沥青改性提供了经济条件[4]。黄科等利用X射线衍射证明热解炭黑是各种型号工业炭黑的混合物[5]。田泉[6]通过热解炭黑沥青混合料试验表明,添加热解炭黑后动稳定度显著提升。K. Lee等人[7]使用热解炭黑改性沥青评价AC-13的混合料性能,结果表明在掺入5%热解炭黑时混合料路面性能达到最佳效果。Z. G. Feng等[8]发现热解炭黑作为外掺剂在掺量小于10%时,其改性沥青贮存稳定性满足规范要求。珠力克[9]用N880工业炭黑及其改性炭黑制备改性沥青,结果表明工业炭黑与改性炭黑皆改善了沥青的高温物理性能,改性炭黑流变、老化及低温性能显著优于工业炭黑。

综上,工业炭黑的掺入显著提升了沥青的高温性能,但微、纳米粉末物质的掺入有可能降低改性沥青的低温性能[10]。偶联剂可增加热解炭黑的活性,进而改善其在沥青中的黏结性能,本研究将通过热解炭黑,文中简称PCB及其偶联产物的改性沥青SHRP试验探讨热解炭黑及其偶联产物改性沥青的PG分级以及两者的高低温性能规律。

## 2. 原材料

### 2.1. 基质沥青

采用岳阳宝利阿尔法70#基质沥青及华特SBS(I-D)。依照公路工程沥青及沥青混合料试验规程对研

究中所用的沥青进行检测, 其检测结果见表 1 与表 2。

**Table 1.** Alpha 70# matrix asphalt test results

**表 1.** 阿尔法 70#基质沥青检验结果

| 检测指标                           | 基质沥青   | 技术要求      | 检测指标                         | 基质沥青  | 技术要求  |
|--------------------------------|--------|-----------|------------------------------|-------|-------|
| 针入度(25°C, 100 g, 5 s) (0.1 mm) | 69.4   | 60~80     | 闪点(°C)                       | 320   | ≥260  |
| 针入度指数 PI                       | -0.67  | -1.5~+1.0 | 溶解度(%)                       | 99.8  | ≥99.5 |
| 软化点(TR&B)(°C)                  | 48.5   | ≥46       | 密度(15°C)(g/cm <sup>3</sup> ) | 1.040 | -     |
| 动力粘度(60°C)(Pa·s)               | 189    | ≥180      | 残留延度(5 cm/min, 10°C)(cm)     | 7     | ≥6    |
| 10°C延度(cm)                     | 37     | ≥15       | 残留针入度比(25°C)(%)              | 61.8  | ≥61   |
| 15°C延度(cm)                     | 大于 100 | ≥100      |                              |       |       |
| 蜡含量(%)                         | 2.0    | ≤2.2      | 质量变化(%)                      | -0.12 | ±0.8  |

**Table 2.** Walter SBS modified asphalt test results

**表 2.** 华特 SBS 改性沥青检验结果

| 检测指标                           | SBS  | 技术要求  | 检测指标                         | SBS  | 技术要求 |
|--------------------------------|------|-------|------------------------------|------|------|
| 针入度(25°C, 100 g, 5 s) (0.1 mm) | 55   | 40~60 | 溶解度(%)                       | 99.7 | ≥99  |
| 针入度指数 PI, 不小于                  | 0.1  | 0     | 离析实验, 48 h 软化点差, 163°C       | 0.8  | ≤2.5 |
| 延度(5 cm/min, 5°C)(cm)          | 34   | ≥20   | 弹性恢复, 25°C, 10 cm, 60 min, % | 95   | ≥75  |
| 软化点(TR&B)(°C)                  | 87   | ≥60   | 残留延度(5 cm/min, 5°C)(cm)      | 21   | ≥15  |
| 动力粘度, (60°C)(Pa·s)             | 8000 | -     | 残留针入度比(25°C)(%)              | 80   | ≥65  |
| 运动粘度, 135°C, (Pa·s)            | 2.1  | ≤3    |                              |      |      |
| 闪点(°C)                         | 318  | ≥230  | 质量变化(%)                      | 0.06 | ±1.0 |

## 2.2. 热解炭黑

选用上海金匙环保科技股份有限公司生产的热解炭黑。表 3 为炭黑检验结果。

**Table 3.** PCB test results

**表 3.** 热解炭黑检验结果

| 性能   | 检测指标  | 检测结果 | 性能                  | 检测指标          | 检测结果  |
|------|---|------|---------------------|---------------|-------|
| 硬度   | 邵尔硬度, (%)                                     | 60.0 | 撕裂性能(直角)            | 中值, (KN/m)    | 36.0  |
|      | 吸碘值, (g/kg)                                   | 81   |                     | 门尼粘度          | KPa   |
| 化学数据 | 手工 DBP, (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /kg) | 76   | 硫化性能 T = 145°C      | T10, (min)    | 3.03  |
|      | PH  | 6.54 |                     | T90, (min)    | 22.25 |
|      | 挥发份, (%)                                      | 6.2  | 拉伸伸长率, (%)          | 565.2         |       |
|      | 45 μm 筛余物, (ppm)                              | 68   | 拉伸强度, (MPa)         | 25.8          |       |
|      | 加热减量, (%)                                     | 2.4  | 拉伸性能 145°C * 30 min | 100%定伸, (MPa) | 2.2   |
|      | 着色强度, (%)                                     | 50   |                     | 200%定伸, (MPa) | 5.0   |
|      | 灰分, (%)                                       | 14.0 |                     | 300%定伸, (MPa) | 8.9   |

### 2.3. 偶联剂

要使热解炭黑在沥青中的分散性提高, 需解决热解炭黑表面大量灰分[11]导致的活性低、结合力较差问题, 本研究选用淮安和元化工的 HY105 钛酸酯偶联剂对热解炭黑进行偶联, 以期改善热解炭黑改性沥青的低温性能。其化学名为异丙基三油酸酰氧基钛酸酯, 结构式如图 1 所示。

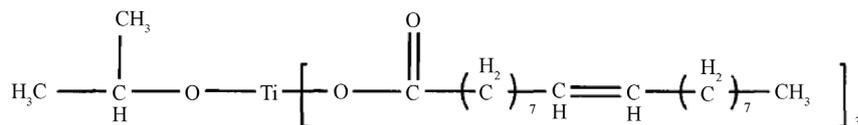


Figure 1. Chemical structure of titanate HY105

图 1. 钛酸酯 HY105 化学结构式

## 3. 热解炭黑及其偶联产物改性沥青制备

### 3.1. 酸洗热解炭黑制备

为避免热解炭黑的骨架结构发生分解, 控制小部分的饱和碳原子氧化, 本实验采用硝酸酸洗降低热解炭黑中灰分含量, 以增加其表面的自由质子。由于热解炭黑是一种纳米级粒子组成的粉体, 其中的杂质难以用常规物理方法进行分离, 所以采用化学方法进行深度脱灰[12]。制得酸洗热解炭黑简称 WPC。

具体步骤如下所示:

- 1) 将浓硝酸与水配制成浓度 20 wt% 的硝酸溶液;
- 2) 将硝酸溶液加入 500 ml 三颈烧瓶, 并将其置于恒温水浴当中;
- 3) 调节恒温水浴为 60℃, 并按照硝酸溶液与热解炭黑比率 10 ml/g 掺入热解炭黑;
- 4) 打开磁力搅拌机, 酸洗 60 min 后关闭磁力搅拌机;
- 5) 待酸洗混合液温度降低至室温时, 将其用真空抽滤机抽滤分离, 用去离子水洗至抽滤水为中性;
- 6) 将抽滤后的炭黑在 120℃ 下干燥 24 h 至恒重;
- 7) 将炭黑研磨, 以备接下来的实验。

### 3.2. 偶联热解炭黑制备

关于钛酸酯偶联剂的作用机理, 目前有化学键结合理论、浸润效应和表面能理论、物理作用理论和配位理论等, 而钛酸酯偶联剂与无机填料间的偶联作用主要是化学键结合理论。本文选用的 HY105 型钛酸酯偶联剂, 其一端为异丙烷氧基, 另一端为不饱和和脂肪族长链。参考南京大学胡柏星[13]关于钛酸酯偶联剂最佳用量的研究, 钛酸酯 HY105 的用量为酸洗热解炭黑用量的 1 wt%。图 2 为钛酸酯偶联剂 HY105 在热解炭黑表面的作用机理。

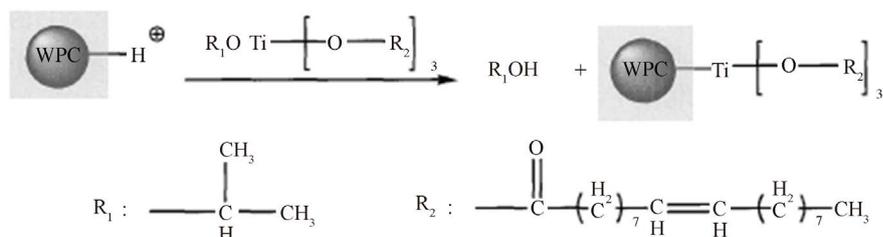


Figure 2. Mechanism of the titanate coupling agent HY105 on the surface of pickled recycled carbon black

图 2. 钛酸酯偶联剂 HY105 在酸洗热解炭黑表面的作用机理

钛酸酯 HY105 偶联修饰硝酸酸洗热解炭黑的实验步骤如下:

- 1) 将 1.0 g HY105 钛酸酯溶于 50 ml 热异丙醇溶液中;
- 2) 在 500 ml 烧杯中加入 100 g 干燥酸洗热解炭黑, 将上述热异丙醇溶液缓慢加入烧杯, 打开磁力搅拌机搅拌 45 min, 然后在室温下静置 24 h;
- 3) 将上述偶联 PCB 在 378 K 下干燥至恒重。

### 3.3. 改性沥青制备

由于热解炭黑与沥青材料的性质有较大差别, 为使两种材料在微观层面上能很好的相容共混, 研究采用德国欧河型号为 EF500 的高速剪切机, 通过借鉴室内聚合物改性沥青的制备工艺来制备改性沥青, 分别制备掺量 5%、10%、15%、20%、25% 的热解炭黑改性沥青与 SBS 热解炭黑复合改性沥青, 以及 10%、15% 掺量的偶联 PCB 改性沥青。

## 4. 改性沥青 Shrp 试验与结果分析

### 4.1. 动态剪切流变试验

试验采用 MCR301 型号动态剪切流变仪。使用 AASHTO T315 中试验标准, 仪器选择抗车辙因子测试模式, 根据规范要求设置对应的应变值与旋转轴。将树脂试模中的试样放入两平行板中, 按照电脑指示开始试验, 温度 70℃ 下不同掺量炭黑改性沥青的抗车辙因子见图 3。

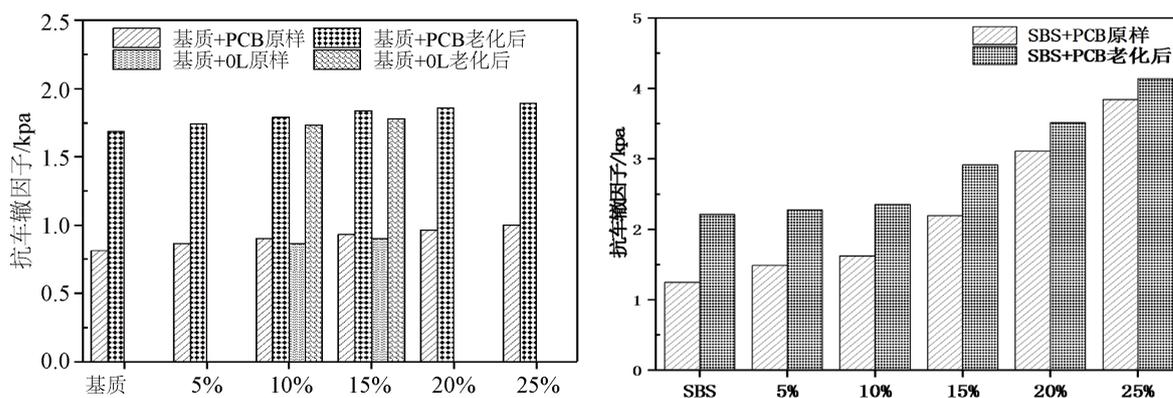


Figure 3. Anti-rutting factors for different carbon blacks at 70°C

图 3. 70℃ 下炭黑不同掺量抗车辙因子

由图 3 可知, 随着热解炭黑掺量的增加, 3 种改性沥青老化前后的抗车辙因子的临界温度随之升高。70℃ 下老化前热解炭黑改性沥青抗车辙因子在掺量 25% 时相比基质沥青提升 23.0%, 老化前 PCB-SBS 复合改性沥青抗车辙因子在掺量 25% 时相比 SBS 改性沥青提升 208.0%, 可知相比基质沥青, PCB 的掺入对 SBS 改性沥青的高温性能提升更为显著; 70℃ 下热解炭黑改性 RTFOT 后沥青抗车辙因子在掺量 25% 时相比基质沥青提升 12.3%, PCB-SBS 复合改性 RTFOT 后沥青抗车辙因子在掺量 25% 时相比 SBS 改性沥青提升 87.1%, 即 PCB 的掺入对 SBS 改性沥青老化后高温性能改善同样优于基质沥青, 但差距减少 150%。依据 PG 分级标准, 基质沥青从原样至 25% 掺量的热解炭黑高温等级都在 64℃, SBS 在掺量低于 20% 时高温等级在 70℃, 在 25% 掺量时达到 76℃。

10% 掺量下偶联 PCB 改性沥青相比 PCB 改性沥青抗车辙因子降低 4.2%, 与 5% PCB 改性沥青的抗车辙因子持平, 15% 掺量下降低 3.3% 与 10% PCB 改性沥青抗车辙因子持平。这表明同掺量下偶联 PCB

改性沥青的高温性能相比热解炭黑改性沥青有降低, 但降低较少高温等级仍在 64℃。

为进一步分析炭黑不同掺量对沥青粘弹性性质的影响, 对温度 70℃ 下相位角作进一步分析。由图 4 可知随着热解炭黑掺量的增加, 相位角逐渐减小, 相位角度数的减小意味着热解炭黑的掺入改善了基质沥青与 SBS 改性沥青的弹性, 在相同荷载下有着更好的变形恢复能力。基质沥青随着热解炭黑的掺入在 70℃ 下相位角下降速率显著低于 SBS 改性沥青, 说明热解炭黑对 SBS 改性沥青的粘弹性改善优于基质沥青。同掺量下的偶联 PCB 相位角高于热解炭黑, 表明偶联 PCB 对沥青的粘弹性影响弱于热解炭黑。

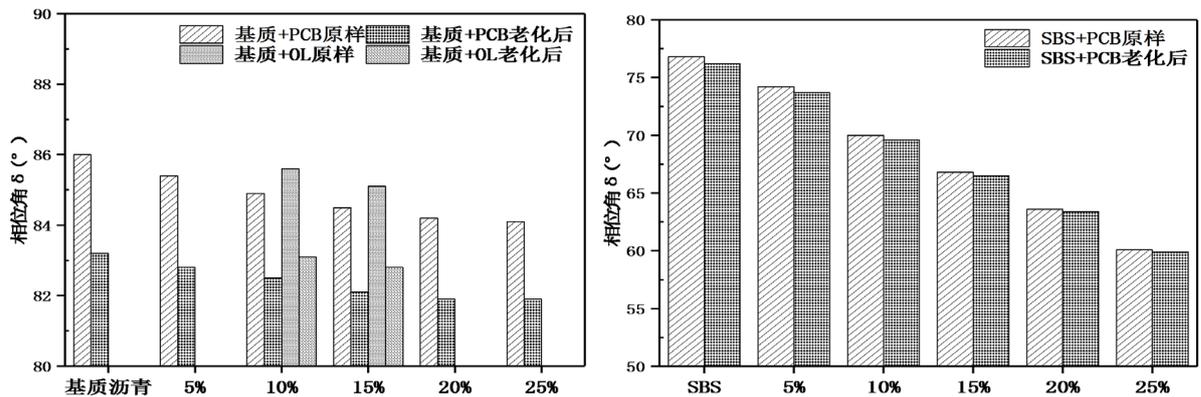


Figure 4. Phase angles of different carbon blacks at 70°C

图 4. 70℃ 下炭黑不同掺量相位角

#### 4.2. 低温弯曲梁流变试验

试验采用 TE-BBR 型号弯曲梁流变仪。

根据 Superpave 规范, 满足 BBR 试验要求的温度在减去 10℃ 后即为 PG 分级低温等级。所用试验材料为经过 RTFOT 短期老化和 PAV 长期老化后的沥青试样, 试验结果见图 5、图 6。

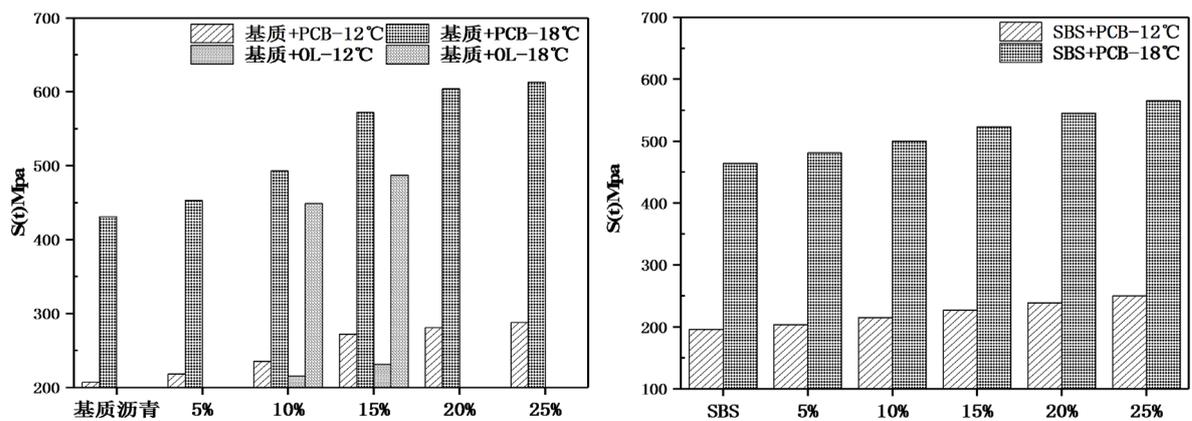


Figure 5. Creep stiffness S for different carbon blacks

图 5. 炭黑不同掺量下蠕变劲度 S

由图 5 与图 6 可知, 随着热解炭黑掺量的增加基质沥青与 SBS 改性沥青的蠕变劲度 S 逐渐增大, m 值逐渐减小。在 -12℃ 下 25% 掺量 PCB 改性沥青相比基质沥青蠕变劲度增长 32.1%, m 值降低 8.4%; 25% 掺量 PCB-SBS 复合改性沥青相比 SBS 改性沥青蠕变劲度增长 27.6%, m 值降低 4.9%。随着热解炭黑掺量的增加基质沥青与 SBS 改性沥青的蠕变劲度 S 逐渐增大, m 值逐渐减小, 表明随着热解炭黑的掺入使

得沥青逐渐变硬, 低温性能逐渐下降, 且同掺量变化下基质沥青的低温性能下降快于 SBS 改性沥青, 但尽管低温性能有所下降基质沥青与 SBS 改性沥青的 PG 低温等级依然在-22℃, 这表明热解炭黑的掺入尽管对低温性能不利, 但影响较小。

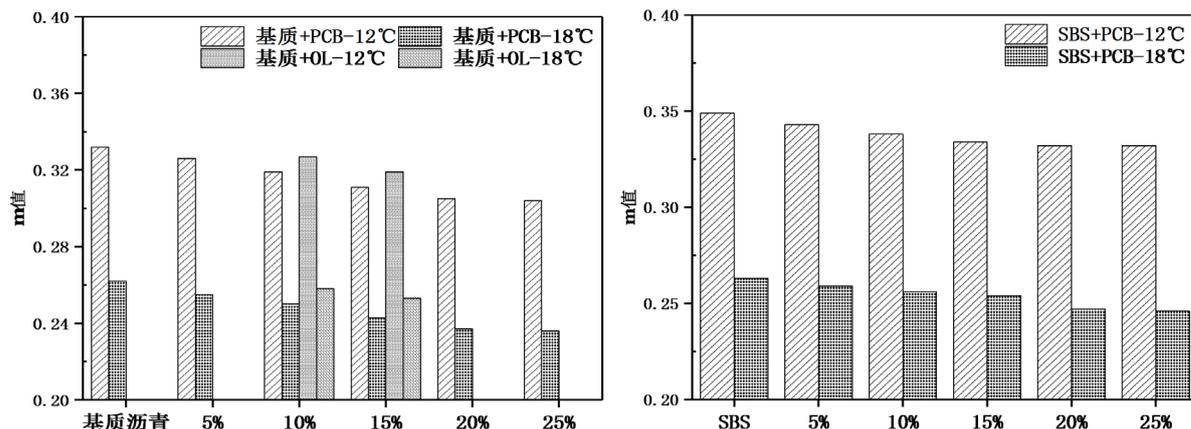


Figure 6. m value for different carbon black content  
图 6. 炭黑不同掺量下 m 值

在-12℃下 15%相比 10%掺量的偶联 PCB 改性沥青蠕变劲度增长 7.4%, m 值降低 2.4%, 对比偶联前后同掺量下 PCB 改性沥青 S 值与 m 值, 偶联 PCB 改性沥青有着更好的低温性能。

### 4.3. 旋转黏度试验

沥青的黏性表征了荷载作用下沥青的抗剪切变形能力, 在以温度为变量时黏性也反映了沥青感温性能的优劣。依照 JTG E20-2011《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》中 T0625-2011 来确定不同沥青混合料的拌合温度和压实温度。本研究采用 BROOKFIELD 数显黏度计, 采用 135℃和 165℃试验温度, 试验结果见表 4, 为便于对比选取部分掺量绘制黏温曲线图见图 7。

Table 4. Brookfield test results for different carbon black content  
表 4. 炭黑不同掺量下布氏黏度试验结果

| 沥青类型        | 掺量 (%) | 135℃  | 165℃  | 拌合温度℃       | 压实温度℃       | 沥青类型     | 掺量 (%)       | 135℃  | 165℃  | 拌合温度℃       | 压实温度℃       |             |
|-------------|--------|-------|-------|-------------|-------------|----------|--------------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|
| 基质沥青        | -      | 0.210 | 0.050 | 140.0~147.5 | 117.3~128.7 | SBS 改性沥青 | -            | 0.591 | 0.193 | 164.8~167.8 | 155.8~160.3 |             |
|             | 5%     | 0.256 | 0.052 | 144.9~150.7 | 127.2~136.0 |          |              | 5%    | 0.623 | 0.214       | 167.2~170.1 | 158.3~162.8 |
| 炭黑热解炭黑改性沥青  | 10%    | 0.353 | 0.060 | 151.3~155.3 | 139.0~145.1 |          | SBS~热解炭黑改性沥青 | 10%   | 0.838 | 0.263       | 168.4~170.5 | 162.2~165.3 |
|             | 15%    | 0.442 | 0.117 | 158.6~162.3 | 147.5~153.1 |          |              | 15%   | 0.912 | 0.342       | 173.0~175.1 | 166.7~169.8 |
|             | 20%    | 0.478 | 0.122 | 158.8~162.4 | 148.7~153.8 |          |              | 20%   | 1.211 | 0.481       | 177.1~178.7 | 172.1~174.6 |
|             | 25%    | 0.491 | 0.127 | 160.3~163.7 | 150.4~155.4 |          |              | 25%   | 1.306 | 0.526       | 177.9~179.5 | 173.3~175.6 |
| 偶联 PCB 改性沥青 | 10%    | 0.387 | 0.086 | 155.2~159.2 | 143.2~149.2 |          |              |       |       |             |             |             |
|             | 15%    | 0.458 | 0.118 | 159.1~162.7 | 148.5~153.8 |          |              |       |       |             |             |             |

由表 4 可知随着掺量的增加黏度逐渐增加, 炭黑的掺入改变了原有沥青的黏度, 使得其所需的拌合及压实温度逐渐升高。在热解炭黑掺量为 25%时基质沥青的拌合温度上升 18℃, 压实所需温度上升

30℃, SBS 改性沥青在掺入 25%热解炭黑后, 拌合温度提高 12℃, 压实温度提高 16℃, 且在掺量从 10% 提升至 15%时, 温度上升最为显著。由于沥青混合料在施工过程中温度的影响十分明显, 热解炭黑掺量过大对施工工艺提出了更高的要求, 因此建议在 SBS 改性沥青中的热解炭黑掺量为 10%。

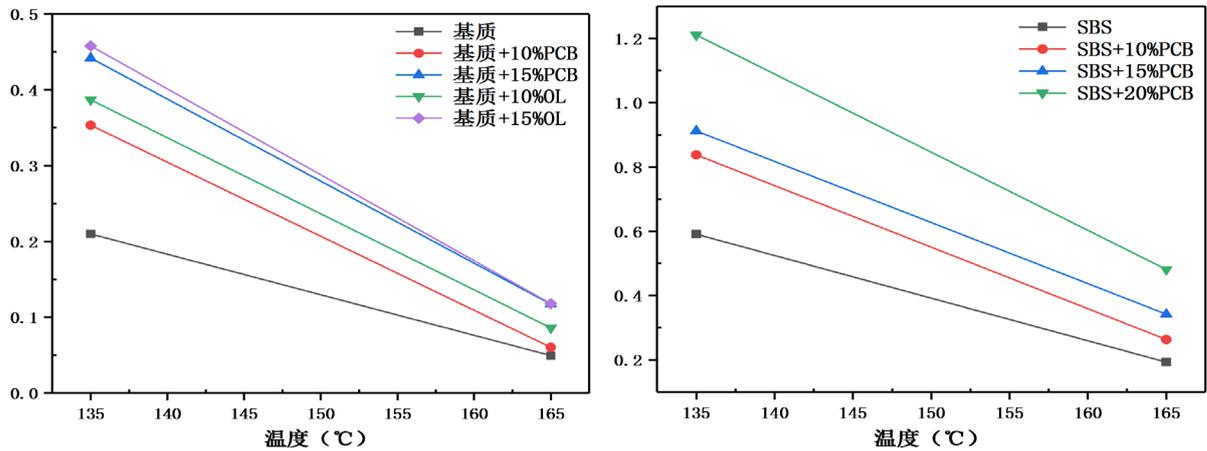


Figure 7. Viscosity curve of carbon black under different dosages  
图 7. 炭黑不同掺量下黏温曲线

由图 7 可知同掺量下的偶联 PCB 相比热解炭黑有着更高的布氏黏度。钛酸酯偶联剂的掺入增加了热解炭黑表面的活性链烃, 活性链烃与沥青稠环的结合越多表现在宏观层面就是沥青的粘聚性增强[14]。

#### 4.4. 离析试验

为进一步验证改性沥青的粘聚性, 采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》JTG E20-2011 中 T0661-2011 中 SBS 类聚合物改性沥青离析试验方法, 实验结果如图 8 所示。

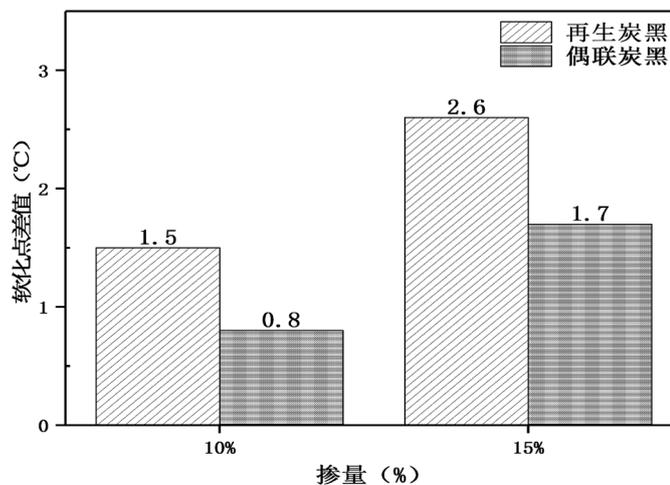


Figure 8. Asphalt isolation test results  
图 8. 沥青离析试验结果

在同等掺量下的偶联 PCB 改性沥青软化点差值显著低于热解炭黑改性沥青, 10%掺量下接近热解炭黑改性沥青软化点差值的 50%, 在 15%掺量下热解炭黑改性沥青的软化点差值大于规范[15]要求的 2.5,

但偶联 PCB 则满足规范要求。这表明偶联 PCB 在与沥青剪切过程中共混程度优于原有热解炭黑, 显著改善原有热解炭黑改性沥青存储稳定性能。因此在满足规范要求下建议热解炭黑在基质沥青中掺量不超过 15%, 偶联 PCB 推荐掺量 15%。

## 5. 结论

1) 通过 SHRP 试验确定基质沥青从原样至热解炭黑掺量 25%时 PG 分级都为 64-22, SBS 改性沥青从原样至热解炭黑掺量为 20%时 PG 分级都为 70-22, 在掺量为 25%时 PG 分级达到 76-22, 热解炭黑对 SBS 改性沥青的高温性能提升较为明显。基质沥青与 SBS 改性沥青 PG 分级低温性能都满足规范要求;

2) 通过布氏黏度试验可知, 热解炭黑与偶联 PCB 的掺入提升了沥青混合料拌合温度与压实温度, 提高了实际施工中对施工工艺的要求, 结合 SHRP 试验在同一 PG 分级下热解炭黑在 SBS 热解炭黑复合改性沥青中掺量为 10%时有较好的施工条件;

3) 通过对热解炭黑进行偶联, 偶联 PCB 对比同掺量的热解炭黑高温性能有所下降, 低温性能则有一定的提升, 但 PG 分级等级并无变化。通过离析试验可知偶联 PCB 相比热解炭黑显著提升了沥青贮存稳定性, 因此建议在长距离沥青运输过程中使用偶联 PCB 改性沥青效果更优, 且在满足规范要求下建议热解炭黑在基质沥青中掺量不超过 15%, 偶联 PCB 建议掺量 15%。

## 基金项目

湖南省自然科学基金资助项目和项目编号 2019JJ40312, 湖南省教育厅资助科研项目和项目编号 18A117。

## 参考文献

- [1] 柳治国. 我国“黑色污染”日益严重[J]. 生态经济, 2016, 32(9): 6-9.
- [2] 鲁锋. 废旧轮胎热解相关实验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 南开大学, 2010: 12-34.
- [3] Allioti, A.G. (1962) Carbon Black—Its Nature and Possible Effects on the Characteristics of Bituminous Road Binders. *Proceedings Australian Road Research Board*, Canberra, 1st 1962, Vol. 1, Part 1.
- [4] 甘有为. 热解炭黑改性沥青微观机理研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2018: 5-12.
- [5] 黄科, 高庆华, 倪燕慧, 唐黎华, 周丽绘, 朱子彬. 废轮胎热解炭黑与工业炭黑的粒径及化学组成[J]. 合成橡胶工业, 2005(6): 34-36.
- [6] 田泉. 废旧轮胎热解产品炭黑改性沥青制备及其混合料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2015: 34-52.
- [7] Lee, K. (2016) Performance Evaluation of Dense Graded Asphalt Mixture Modified by Pyrolysis Carbon Black. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **17**, 732-737. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.3.732>
- [8] Feng, Z.G., Rao, W.Y., Chen, C., Tian, B., Li, X.J., Li, P.L. and Guo, Q.L. (2016) Performance Evaluation of Bitumen Modified with Pyrolysis Carbon Black Made from Waste Tyres. *Construction and Building Materials*, **111**, 495-501. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.143>
- [9] 珠力克. 改性炭黑对沥青性能的影响及其机理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017: 23-39.
- [10] 李睿, 杨帆. 掺废轮胎热解热解炭黑的沥青制备工艺及技术性能探讨[J]. 石油沥青, 2018, 32(5): 59-66.
- [11] Darmstadt, H., Roy, C., Kaliaguine, S., Xu, G., Auger, M., Tuel, A. and Ramaswamy, V. (2000) Solid State  $^{13}\text{C}$ -NMR Spectroscopy and XRD Studies of Commercial and Pyrolytic Carbon Blacks. *Carbon*, **38**, 1279-1287. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00259-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00259-6)
- [12] Darmstade, H., Roy, C. and Kaliaguine, S. (1994) Inorganic Components and Sulphur Compounds in Carbon Blacks from Vacuum Pyrolysis of Used Tires. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, **47**, 891-895.
- [13] 胡柏星. 钛酸酯偶联剂的合成、表征和作用机理[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 1995: 14-27.
- [14] Li, C., Fan, Z., Wu, S., Li, Y., Gan, Y. and Zhang, A. (2018) Effect of Carbon Black Nanoparticles from the Pyrolysis

of Discarded Tires on the Performance of Asphalt and its Mixtures. *Applied Sciences*, **8**, 624.  
<https://doi.org/10.3390/app8040624>

[15] JTGF40-2004, 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;  
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3431, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojtt@hanspub.org](mailto:ojtt@hanspub.org)