

Experimental Study on High and Low Temperature Performance of Recycled Polymer Material Composite Modified Asphalt

Hongyin Li, Hailong Jiang, Wenwu Zhang, Peng Liu, Shanshan Wang, Fei Wang

Qilu Transportation Development Group Co., Ltd., Jinan Shandong
Email: liushengjie0716@163.com

Received: Oct. 13th, 2018; accepted: Nov. 6th, 2018; published: Nov. 13th, 2018

Abstract

With the development of urbanization and industrialization, the number of non-degradable waste tires and plastic film increases year by year. The random disposal of these waste materials not only pollutes the environment, but also threatens human health. In this study, waste rubber powder and recycled PE were used as additives, and modified with asphalt, and its high and low temperature properties were evaluated by softening point, penetration, ductility and modulus of stiffness. Sensitivity analysis of the two additives was carried out by using the range difference method. The results showed that the recycled PE mainly enhanced the high temperature stability of the modified asphalt, but reduced the low temperature crack resistance of the asphalt. The low temperature cracking resistance of asphalt was improved obviously by waste rubber powder, but the stability of asphalt at high temperature was not improved obviously. The results show that the high temperature stability and the low temperature crack resistance of asphalt can be improved by the compound modification.

Keywords

Rubber Powder, Recycled PER, Asphalt, Compound Modification, Rutting

基于再生聚合物材料的复合改性沥青高低温性能试验研究

李洪印, 姜海龙, 张文武, 刘鹏, 王珊珊, 王飞

齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南

文章引用: 李洪印, 姜海龙, 张文武, 刘鹏, 王珊珊, 王飞. 基于再生聚合物材料的复合改性沥青高低温性能试验研究[J]. 土木工程, 2018, 7(6): 795-807. DOI: 10.12677/hjce.2018.76096

Email: liushengjie0716@163.com

收稿日期: 2018年10月13日; 录用日期: 2018年11月6日; 发布日期: 2018年11月13日

摘要

随着城镇化、工业化进程的推进,不可降解的废旧轮胎以及塑料薄膜数量逐年增加,这些废旧材料的随意丢弃不仅污染环境,而且对人类的健康造成威胁。本研究以废旧橡胶粉和再生PE作为添加剂,对基质沥青进行复合改性处理,并通过软化点、针入度、延度及劲度模量等指标评价其高低温性能。运用极差法对两种添加剂的改性作用进行了敏感性分析,结果表明:再生PE主要提升复合改性沥青高温稳定性,但是降低了沥青的低温抗裂性;废旧胶粉显著提高了沥青的低温抗裂性,但是对高温稳定性提升不明显。最终,通过复合改性处理,不仅能提高沥青的高温稳定性,而且可以明显提高沥青的低温抗裂性能。

关键词

橡胶粉, 再生PE, 沥青, 复合改性, 车辙

Copyright © 2018 by authors 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

随着我国汽车保有量的提高,随之而来的废旧轮胎数量急剧增加,如果仅对废旧轮胎进行简单的堆放或掩埋,不仅对空气及土壤环境造成严重污染,同时轮胎中的有毒挥发物质也会对人体健康产生威胁[1]。同时,我国农村地区温室塑料大棚数量逐年增多,产生了大量的废旧塑料薄膜,这种不可降解的高分子材料随意丢弃形成的“白色污染”也愈演愈烈。因此,对废旧轮胎和废旧塑料薄膜的再生利用成为广大科技工作者研究的热点[2]。

在道路工程领域,有研究表明:废胎橡胶粉可以显著提升沥青的高温性能、低温抗裂性能、弹性恢复性能、抗疲劳性能以及抗老化性能[3];废旧塑料薄膜的再生品—再生PE作为一种热固性材料,可以显著提高沥青的高温模量和抗老化性能,又可以改善沥青的韧性[4]。采用废旧橡胶粉、再生PE对道路用沥青进行改性,能够替代目前广泛使用且价格昂贵的SBS(苯乙烯丁二烯共聚)和SBR(丁苯橡胶)等聚合物沥青改性剂[5][6],这种改性方式在节约资源、降低成本、保护环境方面具有非常重大的意义。综合两者作为沥青改性剂对沥青各项性能的提升作用,利用废旧橡胶和再生PE对沥青进行复合改性已经成为新的研究热点。

方长青等通过再生聚乙烯和胶粉对沥青进行复合改性,研究发现复合改性沥青比聚乙烯改性沥青性的整体性能优越,整体性能的提升主要来自于胶粉的剪切屈服和胶粉相互间的联结。通过微观分析发现胶粉改性的过程属于物理改性[7]。Navarro等通过对较高掺量的PE/胶粉复合改性沥青热力学性质的研究,提出经过PE和胶粉的复合改性,实现了改性沥青在整个使用温度区间内性能的提升[8]。欧阳春发通过研究相容剂对低密度聚乙烯(LDPE)/胶粉复合改性沥青性能的影响,提出在LDPE/胶粉复合改性沥青中,沥青的硬度和拉伸强度会随着胶粉含量的增加而下降,而延度则会增加,印证了可以通过相容剂改善LDPE/胶粉复合改性沥青的性能[9]。

国内外大量研究表明,向沥青中添加聚乙烯、橡胶粉等可以显著改善沥青的高温、低温稳定性能。相比于普通沥青路面,聚合物改性沥青路面在抗永久变形、低温抗裂、耐久性等方面都具备更优良的性

能。采用添加废旧胶粉、PE 等对普通沥青进行改性, 不仅能生产出路用性能优异的改性沥青, 还可以实现对废旧塑料、橡胶等聚合物的回收利用, 减小对生态环境造成的污染, 具有显著的环境效益。

虽然已有研究表明胶粉-PE 复合改性整体性能优异, 但胶粉-PE 复合改性中每种改性剂对各项性能指标的影响程度研究较少。本研究采用再生 PE 与废旧轮胎橡胶粉末作为沥青改性剂, 研究胶粉/PE 复合改性沥青的性能及每种改性剂对各项性能指标的贡献。提出胶粉和 PE 单组份、双组份不同掺量下沥青三大基本性能指标: 针入度、软化点、延度的变化规律及每种改性剂对三大指标的贡献度, 探讨复合改性沥青的高低温性能的影响规律。

2. 试验原料和方法

2.1. 主要试验原料与设备

试验用基质沥青为山东华瑞道路材料技术有限公司生产的 70 号沥青。根据《公路沥青路面施工技术规范(JTGF400-2004)》, 该沥青各项指标均符合道路石油沥青 A 级技术要求, 主要技术指标见表 1。

Table 1. 70 performance index of base asphalt

表 1. 70 号基质沥青性能指标

| 项目 | 性能指标 |
|---------------------------|-------|
| 针入度/(10 ⁻¹) | 68 |
| 针入度指数 PI | -0.62 |
| 延度(15℃)/cm | >100 |
| 延度(10℃)/cm | 35 |
| 软化点(环球法)/℃ | 46.2 |
| 密度(15℃)/g/cm ³ | 1.035 |

根据现有研究, 对于橡胶改性沥青一般采用细度为 40~80 目的橡胶粉作为改性剂, 本试验选用的废旧橡胶粉细度为 40 目, 经检测主要成分为丁苯橡胶与聚异戊二烯, 其组成如表 2 所示。PE 颗粒是以废旧温室大棚塑料薄膜为原材料经双螺杆挤出机高温制备的再生 PE 颗粒, 其主要成分为聚乙烯。两种添加剂的形貌见图 1。

Table 2. Physical and chemical composition of waste rubber powder

表 2. 废旧胶粉的物理化学组成

| 橡胶烃 | 炭黑 | 灰分 | 丙酮抽出物 | 水分 | 纤维 |
|-------|-------|------|-------|------|-------|
| 59.00 | 33.65 | 6.04 | 4.22 | 0.21 | <1.00 |



Figure 1. Morphology of two additives (a), waste rubber powder and (b) regenerated PE particles.

图 1. 两种添加剂的形貌(a)废旧胶粉、(b)再生 PE 颗粒

改性沥青制备使用英国 Silverson 公司生产的 L4RT 型沥青高速剪切机；对于沥青针入度(25℃)试验使用上海昌吉地质仪器有限公司生产的 SYD-2801 E 型沥青针入度试验器、延度(15℃)试验使用 LYY-9B 型调温调速沥青测力延伸度仪、软化点试验使用 SYD-2806 F 型全自动沥青软化点试验器。低温弯曲梁试验(BBR)BBR 试验(-18℃)使用美国 CANNON 公司生产的 9728-v35 型弯曲梁流变仪。

依据 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》T0604-2011、T0605-2011、T0606-2011、T0627-2011，分别对基质沥青及复合改性沥青的针入度、延度、软化点(环球法)、蠕变劲度模量(S 值)和 m 值(弯曲梁流变仪法)进行测定。

2.2. 废旧胶粉/再生 PE 复合改性沥青的制备

选定单组份废旧胶粉掺量为 4%、7%、11%、15%，再生 PE 掺量为 4%、5%、6%、7%各四个水平。双组份复合选定废旧胶粉掺量为 7%、11%、15%，再生 PE 掺量为 5%、6%、7%各三个水平，并与基质沥青性能作为对比，共 18 组试验。

复合改性沥青制作方法为：先将一定量的 70 号基质沥青倒入不锈钢容器并放入烘箱加热至 135℃熔融状态，将一定量的再生 PE 颗粒和废旧胶粉加入熔融的沥青中搅拌均匀并放入烘箱中 160℃保温 30 min 进行初步溶胀。将保温后的沥青用电炉加热至 180~190℃并在速度为 5000 r/min 高速剪切 1 h，使胶粉及 PE 颗粒分散均匀，粒度降低。最后将制备好的复合改性沥青进行分装，进行性能指标评价。

3. 结果与分析

废旧胶粉-再生 PE 复合改性沥青的制备影响因素主要有：沥青品种、改性剂的细度及溶解度、胶粉掺量、PE 掺量、剪切温度、剪切时间、存储条件等。综合相关文献和已有研究成果，对 70 号基质沥青进行单组分废旧胶粉、单组份再生 PE、双组份的废旧胶粉/再生 PE 复合改性性能试验。运用极差分析法分析废旧胶粉、再生 PE 两因素的各水平对软化点、针入度、延度、劲度模量的影响程度，探讨废旧胶粉、再生 PE 的单组份掺入量和双组份不同掺入量复合后对改性沥青高温稳定性能、低温抗裂性能的影响规律。

表 3 为基质沥青和不同改性剂掺量下改性沥青的 25℃针入度、软化点、15℃延度和-18℃劲度模量和 m 值的试验数据。从表中数据可以得出，相比于基质沥青，复合改性沥青的针入度、劲度模量显著降低，软化点显著提高，说明与基质沥青相比通过复合改性可以对沥青的高温稳定性和低温抗裂性进行较大的改善。

Table 3. Main performance indexes of matrix asphalt and modified asphalt

表 3. 基质沥青和改性沥青的主要性能指标

| 试验号 | 胶粉掺量/% | 再生 PE 掺量/% | 针入度(25℃)/0.1 mm | 延度(15℃)/mm | 软化点/℃ | 劲度模量 | m 值 |
|-----|--------|------------|-----------------|------------|-------|------|-------|
| 1 | 0 | 0 | 68.2 | 110.7 | 46.2 | 259 | 0.331 |
| 2 | 4 | 0 | 57.2 | 10.3 | 50.3 | 230 | 0.333 |
| 3 | 7 | 0 | 56.2 | 13.2 | 51.0 | 205 | 0.336 |
| 4 | 11 | 0 | 56.3 | 15.2 | 51.8 | 181 | 0.342 |
| 5 | 15 | 0 | 55.9 | 15.3 | 52.0 | 164 | 0.351 |
| 6 | 0 | 4 | 49.2 | 15.4 | 53.8 | 282 | 0.315 |
| 7 | 0 | 5 | 43.0 | 11.2 | 58.0 | 295 | 0.310 |
| 8 | 0 | 6 | 39.4 | 9.3 | 61.3 | 330 | 0.304 |
| 9 | 0 | 7 | 33.3 | 7.5 | 64.0 | 364 | 0.293 |

Continued

| | | | | | | | |
|----|----|---|------|------|------|-----|-------|
| 10 | 7 | 5 | 42.8 | 9.6 | 57.2 | 222 | 0.318 |
| 11 | 7 | 6 | 37.1 | 8.7 | 58.2 | 237 | 0.310 |
| 12 | 7 | 7 | 35.0 | 7.2 | 61.0 | 248 | 0.299 |
| 13 | 11 | 5 | 42.7 | 11.8 | 55.4 | 195 | 0.323 |
| 14 | 11 | 6 | 37.0 | 9.7 | 57.2 | 213 | 0.313 |
| 15 | 11 | 7 | 35.0 | 8.3 | 61.1 | 221 | 0.303 |
| 16 | 15 | 5 | 44.0 | 12.3 | 56.5 | 184 | 0.331 |
| 17 | 15 | 6 | 38.6 | 10.2 | 57.7 | 196 | 0.327 |
| 18 | 15 | 7 | 36.3 | 8.5 | 61.0 | 205 | 0.314 |

3.1. 针入度试验结果

针入度是表征沥青软硬程度、粘稠度以及抵抗剪切破坏能力的指标，在一定程度上也反映沥青的相对黏度。针入度是条件粘度指标(等温粘度)，粘度的提高说明沥青材料在高温条件下具有较强的抗剪切能力，故针入度在一定程度上表征了沥青的高温稳定性[10]。

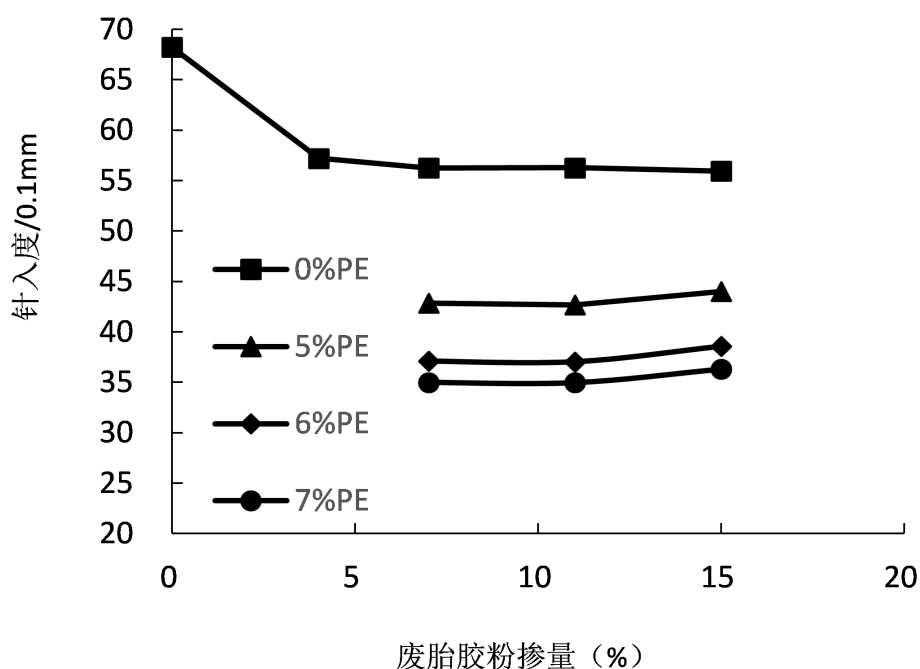


Figure 2. Effect of waste rubber powder addition on penetration of modified asphalt
图 2. 废旧胶粉掺入量对改性沥青针入度的影响

从图 2 可以看出单组份废旧胶粉的掺量从 0%~4%时针入度不断降低，掺量为 4%~15%时针入度变化幅度很小，说明在废旧胶粉掺入量较小时沥青由硬变软，随着掺入量增加沥青软硬程度几乎无变化，表明加入废旧胶粉后在一定程度上提高了沥青高温稳定性，继续增加胶粉掺量高温稳定性无明显变化。在再生 PE 5%、6%、7%三个掺量水平下，随着胶粉掺量的增加针入度略有升高，但变化不明显，说明较高胶粉掺量对沥青高温稳定性提升不明显。

随着胶粉含量的增加，沥青中的分散相胶质更容易与胶粉颗粒互相吸引粘结成立体网状结构，这就

相当于在沥青中油分不变的情况下增加了固相胶粉,使沥青变硬变稠,因此针入度下降。随着胶粉掺量继续增加,胶粉粒子的分散性变差,改性效果变化不大,改性沥青的针入度变化不明显[11]。

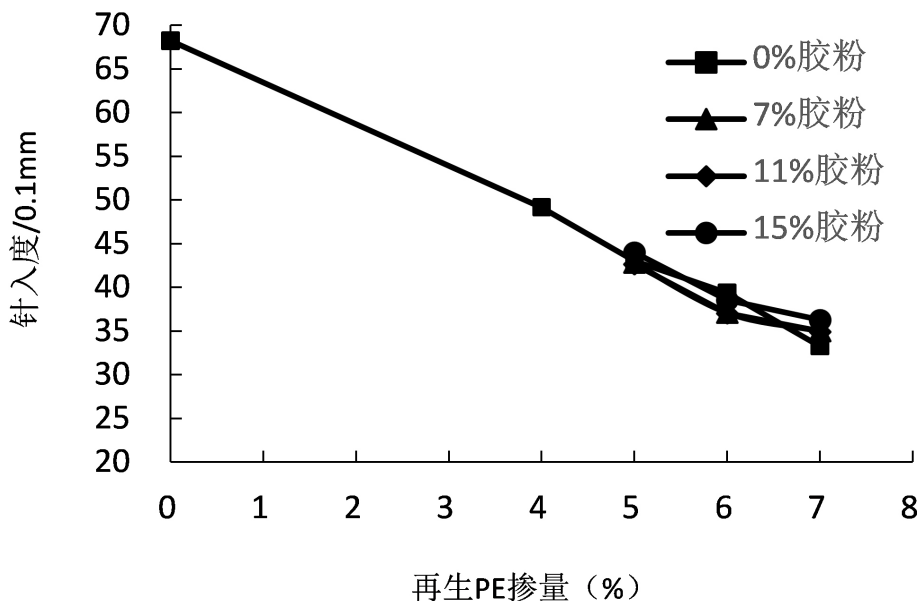


Figure 3. Effect of recycled PE content on penetration of modified asphalt
图 3. 再生 PE 掺入量对改性沥青针入度的影响

从图 3 可以看出随着单组份 PE 掺量的增加针入度呈线性下降趋势,说明沥青逐渐变硬,高温稳定性明显提升。在废旧胶粉 7%、11%、15%三个掺量水平下,随着 PE 掺量的增加针入度也呈下降趋势。

PE 受热溶化后,由晶固态变为液态,在高速剪切作用下均匀地分布到沥青中,发生溶胀,原来褶皱规整的聚乙烯链随着沥青中的蜡分子的渗入逐渐伸展开来,冷却后聚乙烯和蜡分子结晶,增加了其抵抗外力的能力[7]。因此沥青粘度提高,针入度降低,故高温稳定性提高。

Table 4. Range analysis of penetration

表 4. 针入度的极差分析

| 项目 | 废旧胶粉 | 再生 PE |
|---------|------|-------|
| 水平 1 均值 | 38.3 | 43.2 |
| 水平 2 均值 | 38.2 | 37.6 |
| 水平 3 均值 | 39.6 | 35.4 |
| 极差 | 1.4 | 7.7 |

通过极差分析两因素对改性沥青针入度的影响见表 4。根据表 4 试验数据可以看出废旧胶粉在各水平下针入度变化不明显,再生 PE 在各水平下针入度明显降低。从极差值可以看出,再生 PE 对双组份复合改性沥青针入度的影响效果远大于废旧胶粉,即再生 PE 对针入度的影响占主导地位。

3.2. 延度试验结果分析

延度是评定沥青塑性的重要指标,可以反映材料的抗变形能力,延度越大,表明沥青的塑性变形性能越好。延度试验结果能间接反映出低温下的沥青黏度与剪切敏感性的关系,与路面的使用性能有一定的相关性。

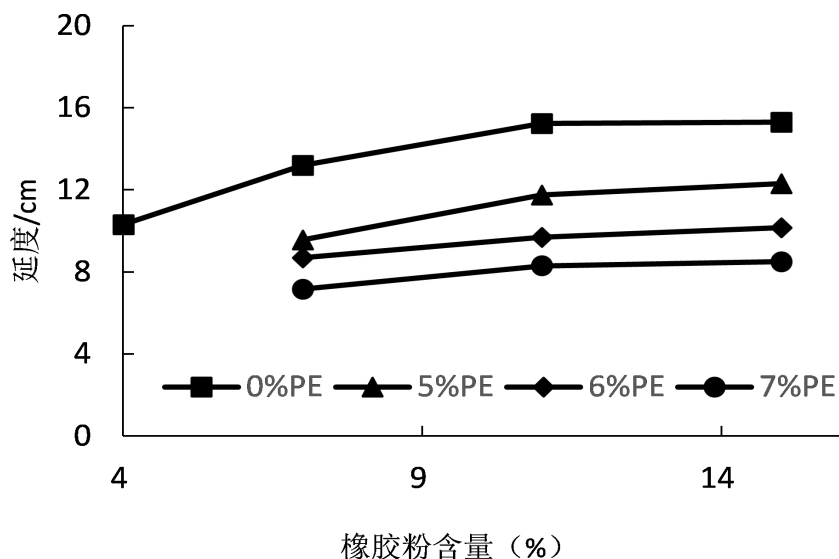


Figure 4. Influence of the amount of waste rubber powder on the ductility of modified asphalt
图 4. 废旧胶粉掺入量对改性沥青延度的影响

试验数据看出基质沥青 15℃延度大于 100，但加入 4%胶粉后延度下降显著。图 4 可以看出胶粉掺量从 4%增加到 11%沥青延度不断增加，继续增加掺量延度无明显变化。在再生 PE 5%、6%、7%三个掺量水平下，随着胶粉掺量的增加延度增加，掺量大于 11%后延度增加不明显。说明随着胶粉掺量的增加改性沥青的低温柔性能有所改善，继续增加胶粉掺量改善效果不明显[12]。

废旧胶粉加入到沥青中后，部分胶粉以微粒或丝状的形态分布在沥青基中。胶粉颗粒体积小，数量多，低温时它们与沥青基体的模量不同，受拉伸时在拉伸方向产生较大的应变，于是在胶粉颗粒和沥青基体界面处将发生高度应力集中，产生大量银纹和剪切带，所以与基质沥青相比低温延度大大降低。一定掺量下，一方面粗的废旧胶粉颗粒形成骨架结构，防止沥青在低温条件下产生破坏性裂纹，从而改善了沥青的低温柔韧性；另一方面微观上沥青胶体中的分散相胶质与部分胶粉颗粒由于相互之间的吸引力而结合在一起形成立体网状结构，进而会提高沥青的黏度和塑性变形，宏观表现出延性增加[13]。

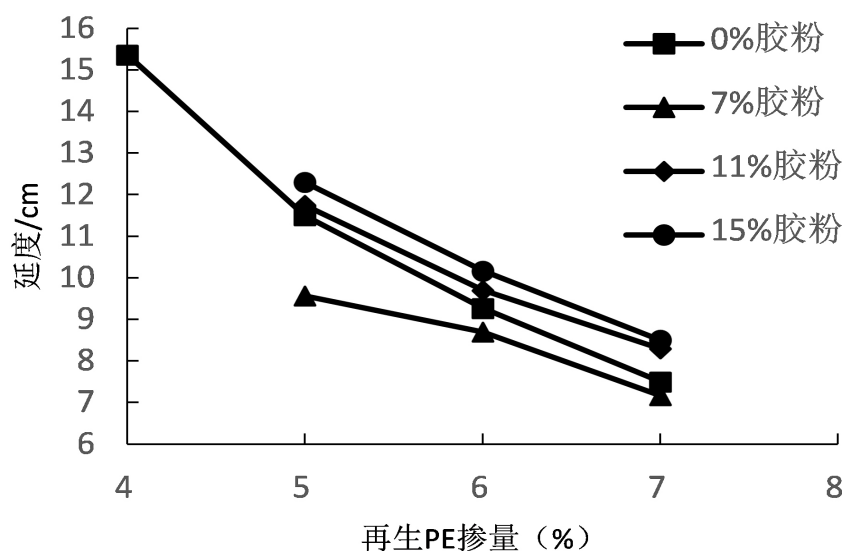


Figure 5. Effect of recycled PE content on the ductility of modified asphalt
图 5. 再生 PE 掺入量对改性沥青延度的影响

从图 5 可以看出随着单组份再生 PE 的掺量的增加沥青延度不断降低, 在废旧胶粉 7%、11%、15% 三个掺量水平下, 随着再生 PE 掺量的增加延度也不断降低。

延度的降低可以从两方面解释: 一方面, 当 PE 在高速剪切作用下分散于沥青中 PE 由晶态转为非晶态, 为了降低表面能 PE 会吸附沥青中的部分轻质组分, 并在这些轻质组分作用下发生溶胀, 使沥青的聚集态结构组成由溶胶型、溶胶凝胶型转化为凝胶型结构, 大大改变沥青的粘弹性质, 使沥青变硬变脆[14]; 另一方面, 冷却后聚乙烯重新结晶成聚乙烯颗粒, 在拉伸作用下颗粒会产生应力集中现象, 产生大量银纹和剪切带。综合这两个方面的因素, 宏观表现出 PE 改性沥青延度降低。

Table 5. Range analysis of ductility
表 5. 延度的极差分析

| 项目 | 废旧胶粉 | 再生 PE |
|---------|------|-------|
| 水平 1 均值 | 8.5 | 11.2 |
| 水平 2 均值 | 9.9 | 9.5 |
| 水平 3 均值 | 10.3 | 8.0 |
| 极差 | 1.8 | 3.2 |

通过极差分析两因素对改性沥青延度的影响见表 5。根据表 5 试验数据可以看出废旧胶粉在各水平下延度呈升高趋势, 再生 PE 在各水平下延度明显降低趋势。从极差值可以看出, 再生 PE 对双组份复合改性沥青延度降低作用的影响大于废旧胶粉对延度升高的影响。

3.3. 软化点试验结果分析

温度敏感性是沥青性质的重要指标之一, 而沥青软化点是反应沥青温度敏感性的重要指标。沥青随着温度的升高会逐渐变软, 当达到规定黏度时的温度称之为沥青软化点。一般来说高温稳定性越好的沥青, 软化点会越高。因此, 在我国乃至国际上, 沥青软化点均是衡量沥青性能的一项重要指标[15]。

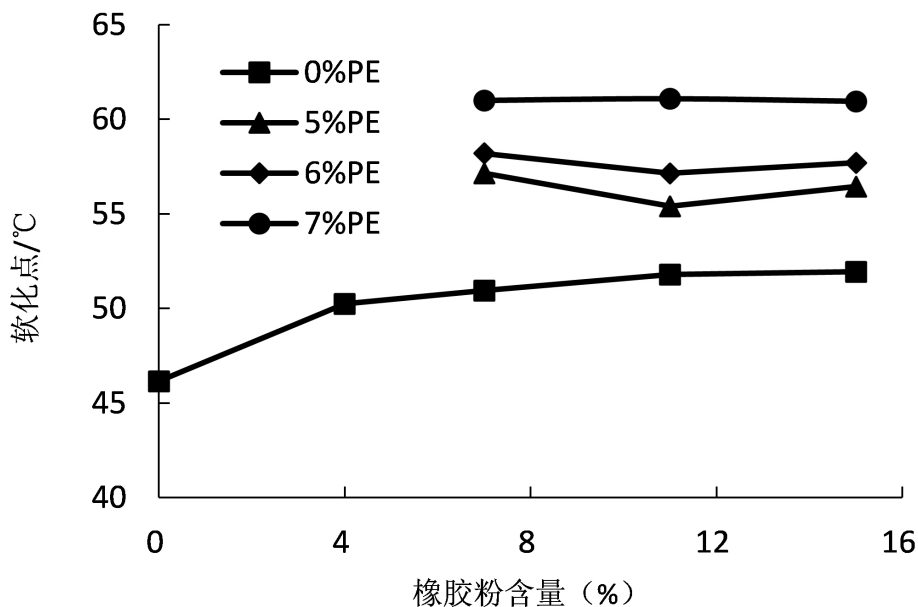


Figure 6. Effect of waste rubber powder addition on softening point of modified asphalt
图 6. 废旧胶粉掺入量对改性沥青软化点的影响

从图6可以看出单组份废旧胶粉的掺量从0%~7%时软化点不断升高,掺量为7%~15%时软化点升高幅度较小,说明在废旧胶粉掺入量较小时沥青温度敏感性下降,表明加入废旧胶粉后在一定程度上提高了沥青高温稳定性,继续增加胶粉掺量高温稳定性提升不显著。在再生PE 5%、6%、7%三个掺量水平下,每个水平随着胶粉掺量的增加软化点变化不明显,说明胶粉掺量大于7%对沥青高温稳定性提升不明显。

胶粉对沥青软化点影响原理是:一方面胶粉颗粒的网状结构在高温高速剪切搅拌条件下会在一定程度上氧化裂解,变成分子量小的网状结构和链状物。随着剪切搅拌的继续,胶粉颗粒中的硫、炭黑、氧化硅、氧化铁等活性成分物质进入沥青胶体体系中与沥青发生物质交换,从而改善沥青温度敏感性以及低温性能。另一方面胶粉颗粒在沥青胶体中随机分布并互相连接与普通沥青形成加筋结构,从而提高了高温稳定性[12]。但当胶粉掺量增加到一定值时,由于胶粉颗粒会逐渐团聚在一起,难以起到改善沥青性能的作用,此时除了对软化点没有提高作用,可能对改性沥青的延度产生负面影响。

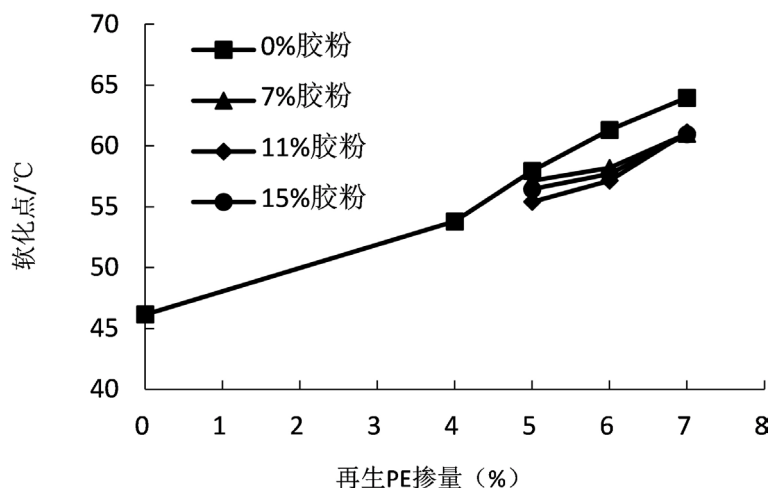


Figure 7. Effect of recycled PE content on softening point of modified asphalt

图7. 再生PE掺入量对改性沥青软化点的影响

从图7可以看出随着单组份再生PE掺量的增加沥青软化点不断增加,在废旧胶粉7%、11%、15%三个掺量水平下,每个水平下随着再生PE掺量的增加软化点也不断升高,但每个水平均小于单组份PE时的软化点。

上述现象做如下解释:颗粒越小,比表面积越大,因此PE的表面能会随着剪切机的高速剪切而急剧增大。为保持表面能平衡,PE颗粒会吸附沥青中与其结构相近的轻质组分,以降低表面能。由于轻质组分的溶胀作用会约束沥青的移动,从而改善了沥青的高温性能,导致沥青的温度敏感性降低、软化点增高。PE/胶粉复合改性沥青中由于胶粉的加入改变了沥青的连续网状结构使沥青向溶胶型转化,温度敏感性下降,黏度降低,导致软化点有所减小。

Table 6. Range analysis of softening point

表6. 软化点的极差分析

| 项目 | 废旧胶粉 | 再生PE |
|-------|------|------|
| 水平1均值 | 58.8 | 56.4 |
| 水平2均值 | 57.9 | 57.7 |
| 水平3均值 | 58.4 | 61.0 |
| 极差 | 0.4 | 4.7 |

通过极差分析两因素对改性沥青软化点的影响见表 6。根据表 6 试验数据可以看出废旧胶粉在各水平下软化点变化不明显,再生 PE 在各水平下软化点明显升高。从极差值可以看出,废旧胶粉在 7%~15% 掺量下对复合改性沥青软化点几乎无影响。再生 PE 对复合改性沥青软化点升高作用起决定性作用。

3.4. 劲度模量试验结果分析

沥青材料是一种粘-弹-塑性材料,在荷载的作用下,应力与应变之间呈现非线性关系。劲度模量是表示沥青材料的这种特性的概念,计算方法是在规定的时间(t)和温度(T)条件下,应力与总应变的比值,即:

$$S(t,T) = \frac{\sigma}{\varepsilon} t, T$$

在一定温度下,通过在沥青小梁试件上施加 980 mN 荷载 240 s,计算 60 s 时的劲度模量和蠕变曲线的斜率 m 两个主要的技术指标。其中 m 值表征沥青劲度随时间的变化及应力松弛能力大小的指标, m 值越大沥青的应力松弛性能越好; m 值越小则沥青越脆,越容易开裂。而劲度模量越大沥青材质越硬,这是因为沥青劲度模量越大则产生单位应变所需的应力就会越大。根据 SHRP 规定要求,劲度模量不大于 300 MPa, m 值不小于 0.3。

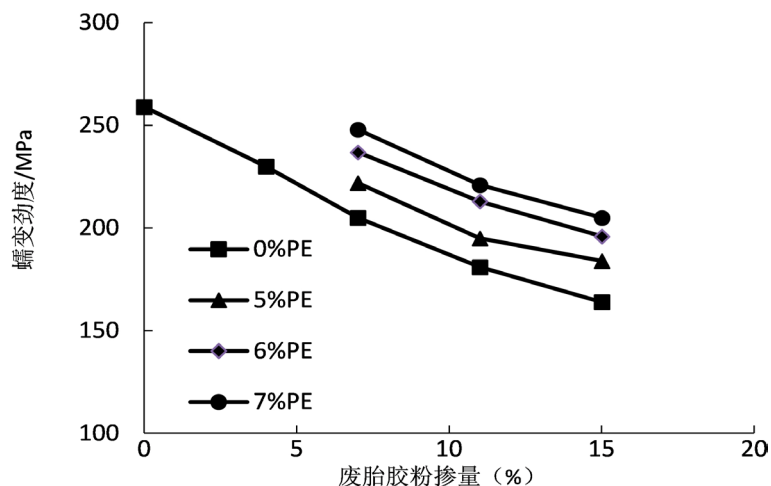


Figure 8. Effect of waste rubber powder addition on stiffness modulus of modified asphalt
图 8. 废旧胶粉掺入量对改性沥青劲度模量的影响

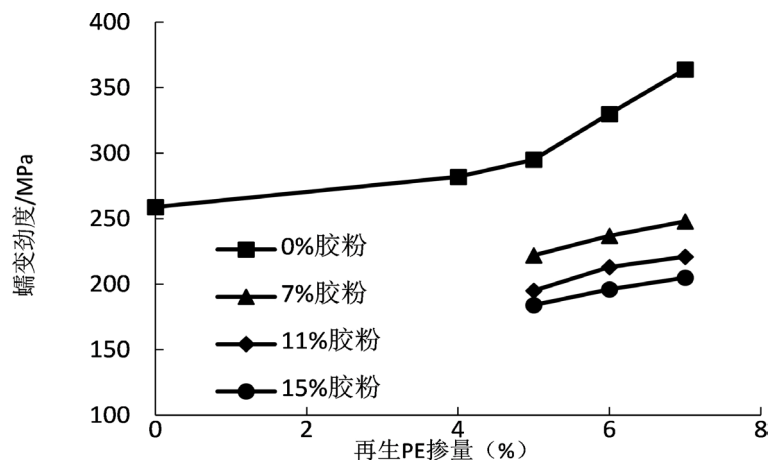


Figure 9. Effect of recycled PE content on stiffness modulus of modified asphalt
图 9. 再生 PE 掺入量对改性沥青劲度模量的影响

由图 8、图 9 可以看出, 单组份和双组份各水平 PE 掺量下, 随着废旧胶粉掺量的增加改性沥青的劲度模量均减小, 这说明在相同的低温环境下沥青材质会随着胶粉掺量的增加而变软相应的抗低温开裂的能力会提高; 单组份和双组份各水平胶粉掺量下, 改性沥青的劲度模量均随着再生 PE 掺量的增加而升高, 表明增加 PE 掺量沥青材质变硬。-18℃下, 单组份胶粉和双组份改性沥青蠕变劲度模量均小于 300 MPa, 满足 SHRP 规定要求; 单组份 PE 掺量大于 6%劲度模量大于 300 MPa, 不满足 SHRP 规定要求。

Table 7. Range analysis of stiffness modulus

表 7. 劲度模量的极差分析

| 项目 | 废旧胶粉 | 再生 PE |
|---------|------|-------|
| 水平 1 均值 | 236 | 200 |
| 水平 2 均值 | 210 | 215 |
| 水平 3 均值 | 195 | 225 |
| 极差 | 41 | 24 |

通过表 7 对各水平废旧胶粉和再生 PE 劲度模量的极差分析可以得出: 随着废旧胶粉掺量从水平 1 到水平 3 的增加, 沥青劲度模量不断减小, 沥青变软; 而再生 PE 掺量从水平 1 到水平 3 的增加, 沥青劲度模量不断增加, 沥青变硬。比较极差的数值大小可得: 胶粉对复合改性沥青劲度模量的影响效果大于再生 PE。

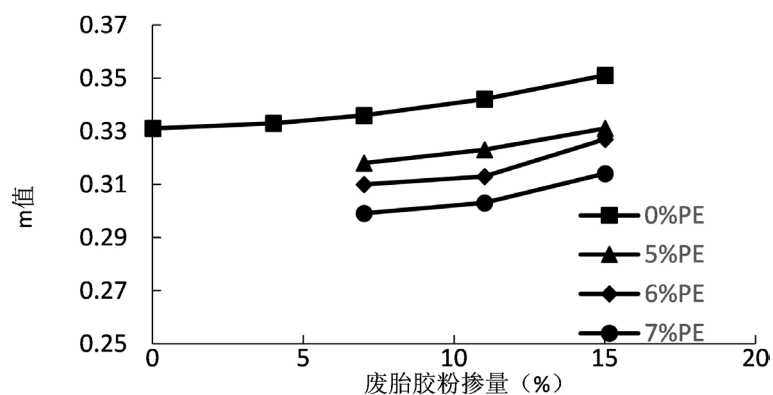


Figure 10. Effect of waste rubber powder addition on M value of modified asphalt

图 10. 废旧胶粉掺入量对改性沥青 m 值的影响

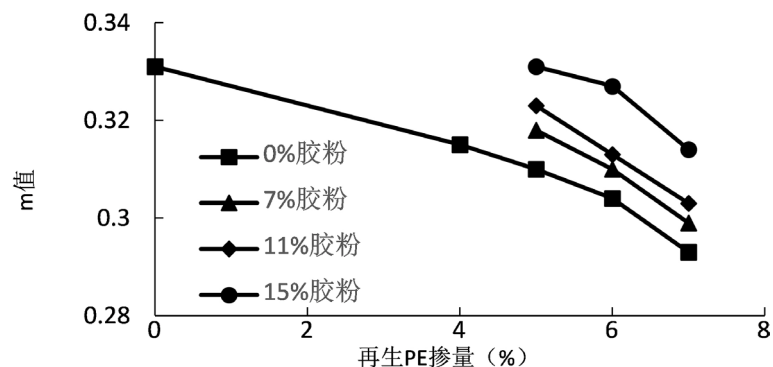


Figure 11. Effect of recycled PE content on M value of modified asphalt

图 11. 再生 PE 掺入量对改性沥青 m 值的影响

由图 10 可以看出, 单组份和双组份各水平 PE 掺量下, 改性沥青的 m 值均随着废旧胶粉掺量的增加而增加, 表明增加胶粉掺量沥青在同一低温环境下应力松弛能力升高, 低温抗裂能力提高。由图 11 所示,

单组份和双组份各水平胶粉掺量下, 改性沥青的 m 值均随着再生 PE 掺量的增加而降低, 表明增加 PE 掺量沥青应力松弛能力升高, 低温抗裂能力下降。 -18°C 下, 单组份胶粉和双组份改性沥青 m 值均大于 0.3, 满足 SHRP 规定要求; 单组份 PE 掺量大于 6% 劲度模量小于 0.3, 不满足 SHRP 规定要求。

Table 8. Range analysis of m value

表 8. m 值的极差分析

| 项目 | 废旧胶粉 | 再生 PE |
|---------|-------|-------|
| 水平 1 均值 | 0.309 | 0.324 |
| 水平 2 均值 | 0.313 | 0.309 |
| 水平 3 均值 | 0.324 | 0.305 |
| 极差 | 0.015 | 0.019 |

通过表 8 对各水平废旧胶粉和再生 PE m 值的极差分析可以得出: 随着废旧胶粉掺量从水平 1 到水平 3 的增加, m 值不断增加, 沥青应力松弛能力提高, 抗开裂能力提高; 而再生 PE 掺量从水平 1 到水平 3 的增加, m 值不断减小, 沥青应力松弛能力下降, 抗开裂能力下降。比较极差的数值大小可得: 胶粉对复合改性沥青 m 值的影响效果和再生 PE 相当, 再生 PE 影响效果稍大。

4. 结论

1) 较高掺量下废旧胶粉对复合改性沥青的针入度无影响, 极差分析得出再生 PE 是引起复合改性沥青针入度下降的主要原因。

2) 废旧胶粉对复合改性沥青延度起提高作用, 再生 PE 对延度起降低作用, 极差分析得出再生 PE 对延度降低的影响大于废旧胶粉对延度升高的影响。

3) 从表征沥青高温性能的软化点指标可以看出, 废旧胶粉对复合改性沥青高温性能的提升有限, 再生 PE 使软化点指标提升显著。极差分析得出再生 PE 对复合改性沥青高温性能的提升起决定性作用。

4) 从表征沥青低温抗裂性能的蠕变劲度和 m 值可以看出, 废旧胶粉提升复合改性沥青的低温抗裂性, 再生 PE 使低温抗裂性能降低。极差分析得出废旧胶粉对沥青低温抗裂性升高的作用大于再生 PE 的降低作用。

5) 通过废旧胶粉与再生 PE 的复合改性, 不仅能提高沥青的高温抗车辙性能, 同时改善了其低温抗开裂性能。

参考文献

- [1] 庾晋, 白杉. 废旧轮胎回收利用现状和利用途径[J]. 橡塑技术与装备, 2003(9): 11-18.
- [2] 曹凌云, 朱瑞, 胡春星, 费学宁, 张宝莲. 废旧橡胶和塑料再生利用的研究现状[J]. 橡塑资源利用, 2011(1): 7-12.
- [3] Yao, Z.Y., Zhang, J.Z., Gao, F.L., Liu, S.J. and Yu, T.H. (2018) Integrated Utilization of Recycled Crumb Rubber and Polyethylene for Enhancing the Performance of Modified Bitumen. *Construction and Building Materials*, **170**, 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.080>
- [4] 张巨松, 王文军, 赵宏伟, 等. 聚乙烯和聚乙烯胶粉复合改性沥青的实验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(2): 267-270.
- [5] 吕伟民, 李立寒. 几种聚合物改性沥青性能的比较[J]. 石油沥青, 1998(3): 7-11.
- [6] Sengoz, B. and Isikyakar, G. (2008) Analysis of Styrene-Butadiene-Styrene Polymer Modified Bitumen Using Fluorescent Microscopy and Conventional Test Methods. *Journal of Hazardous Materials*, **150**, 424-432. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.122>
- [7] Yeh, P.H., Nien, Y.H., Chen, J.H., et al. (2005) Thermal and Rheological Properties of Maleated Polypropylene Mod-

- ified Asphalt. *Polymer Engineering and Science*, **45**, 1152-1158. <https://doi.org/10.1002/pen.20386>
- [8] Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza, F.J., *et al.* (2010) Novel Recycled Polyethylene/Ground Tire Rubber/Bitumen Blends for Use in Roofing Applications: Thermo-Mechanical Properties. *Polymer Testing*, **29**, 588-595. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.03.010>
- [9] Ouyang, C., Gao, Q., Shi, Y., *et al.* (2012) Compatibilizer in Waste Tire Powder and Low-Density Polyethylene Blends and the Blends Modified Asphalt. *Journal of Applied Polymer Science*, **123**, 485-492. <https://doi.org/10.1002/app.34634>
- [10] 李德超, 武贤慧. PE 改性沥青性能研究[J]. 石油沥青, 2003, 17(3): 39-43.
- [11] 刘毅, 李晓林, 张立群. 废橡胶粉改性沥青的研究[J]. 特种橡胶制品, 2007, 28(5): 14-18.
- [12] 刘仲皓. 胶粉改性沥青的性能研究[J]. 北方交通, 2012(1): 22-24.
- [13] 吴中华. 橡胶粉改性沥青及混合料路用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [14] 庞晓伟, 顾建平, 沈美荣, 等. 沥青软化点试验影响因素分析[J]. 中国市政工程, 2014(6): 48-50.
- [15] 纪宗良. 浅谈橡胶粉改性沥青性能的影响机理[J]. 黑龙江交通科技, 2011(10): 158-160.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 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: hjce@hanspub.org