

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.015

# SBR/PP 复合聚合物及 SBS 改性沥青混合料 疲劳特性研究\*

张平<sup>1</sup>, 何延兵<sup>2</sup>

(1.长沙理工检测咨询有限责任公司, 湖南 长沙 410076;

2.湖南省江杉高速公路建设开发有限公司, 湖南 长沙 410076)

**摘要:** 为提高沥青路面的承载能力与耐久性,通过复合聚合物改性改善沥青混合料的强度及抗疲劳性能。采用丁苯橡胶(SBR)与聚丙烯(PP)比例为 75:25、50:50、25:75 的复合聚合物和 SBS 聚合物,分别以 4%、5%、6%的掺量对 70# 基质沥青进行改性,通过强度试验确定聚合物最佳掺量,开展最佳掺量下聚合物改性沥青混合料间接拉伸疲劳试验和直接拉伸疲劳试验,对复合聚合物与 SBS 改性沥青混合料的疲劳特性进行对比分析。结果表明,复合聚合物与 SBS 的最佳掺量均为 5%;复合聚合物中 SBR 与 PP 掺配比例为 75:25、50:50 时,复合聚合物改性沥青混合料的强度高于同掺量下 SBS 改性沥青混合料;最佳掺量下,SBR 与 PP 掺配比例为 75:25 的复合聚合物改性沥青混合料的疲劳性能最佳,与 SBS 改性沥青混合料相比提高约 40%。

**关键词:** 公路;复合聚合物改性沥青;SBS 改性沥青;疲劳性能;丁苯橡胶(SBR);聚苯烯(PP)

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)05-0068-04

交通荷载、环境条件及材料差异等均可能导致沥青路面发生车辙、水损害、疲劳破坏等病害<sup>[1-3]</sup>。影响沥青混合料疲劳性能的因素有许多,沥青胶结料是关键因素之一。由于普通基质沥青无法承受较大的交通荷载,须掺入添加剂来改善其性能,提高其抗疲劳性能。聚合物改性剂主要通过改善沥青胶结料的物理、化学及流变性能增强沥青混合料的抗疲劳、抗车辙等性能<sup>[4-5]</sup>。道路施工领域最常用的聚合物有苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS)、丁苯橡胶(SBR)、乙烯-乙酸乙烯酯(EVA)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)等。已有研究表明,沥青混合料中使用 5%左右的聚合物改性能使其具有较好的抗疲劳性能<sup>[6-7]</sup>。但聚合物与沥青胶结料的相容性较差,在沥青胶结料中其性能不稳定,常采用与沥青胶结料和聚合物相容性较好的纳米黏土来改善其不稳定性<sup>[8-9]</sup>。

复合聚合物是使用两种及以上聚合物制备而成的聚合物组合物<sup>[10]</sup>。目前热塑性弹性体聚合物(如 SBS)改性沥青已取得了较好的成效<sup>[11-12]</sup>,对 SBR/PP 复合改性沥青混合料的高温稳定性、水稳定性及低温抗裂性也进行了一定研究<sup>[13-14]</sup>,但未开展疲劳性能研究。本文采用不同组分比例的 SBR 与 PP 组

合制成复合聚合物对基质沥青进行改性,以相同条件下 SBS 改性沥青作为对照,通过沥青混合料间接拉伸强度及疲劳试验、直接拉伸强度及疲劳试验,对比分析 SBR/PP 复合聚合物和 SBS 改性沥青混合料的疲劳特性。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

(1) 沥青。选用同一批次的东海牌 70# 基质沥青,参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对其性能指标进行测试,结果见表 1,均符合规范要求。

表 1 东海牌 70# 基质沥青性能指标检测结果

检测项目	检测结果
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/mm	6.7
延度(15 °C, 5 cm/min)/cm	118
软化点(环球法)/°C	47.6
60 °C 动力黏度/(Pa·s)	189
蜡含量/%	2.0
15 °C 密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.026

\* 基金项目:湖南省交通运输厅科技项目(201904)

(2) 集料。集料选用湖南怀化某采石场的石灰岩集料,根据JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》进行集料性能指标测试,结果见表2,均符合规范要求。

表2 集料性能指标检测结果 单位:%

检测项目	检测结果	检测项目	检测结果
针片状颗粒含量	10.7	磨光值	55.6
压碎值	20.6	吸水率	3.6
磨耗值	21.7		

(3) 级配。按JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》进行级配设计,级配曲线见图1。

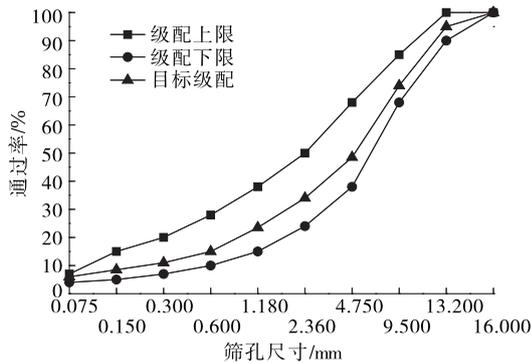


图1 沥青混合料级配曲线

## 1.2 聚合物改性剂

选择两类聚合物改性剂,分别为单一的SBS聚合物改性剂、由SBR与PP组合而成的复合聚合物改性剂。复合聚合物中SBR与PP掺配比例分别为75:25、50:50和25:75,分别称为A型聚合物、B型聚合物、C型聚合物。考虑到采用聚合物改性存在稳定性问题,在改性剂中加入纳米黏土改善其稳定性。

## 1.3 配合比设计

(1) 改性沥青制备。两种改性沥青的制备采用同样的方式。先将70#基质沥青快速升温至流动状态,将基质沥青和不同掺量聚合物混合后手动搅拌10 min,然后在160℃温度下用高速剪切仪以3000 r/min的转速搅拌45 min;加入纳米黏土剪切15 min,在170℃温度下发育60 min得到改性沥青。共制备改性剂掺量为4%、5%、6%的聚合物改性沥青12种。

(2) 最佳油石比确定。采用马歇尔试验方法进行体积设计,以4.5%为目标空隙率确定最佳油石比。以5%作为初始油石比,按照0.5%的间隔分别

制作油石比为4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%的5组试件进行马歇尔试验,根据试验结果,确定复合聚合物改性沥青的最佳油石比为5.4%、SBS改性沥青的最佳油石比为5.1%。

## 1.4 试件制备

根据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,采用马歇尔击实法成型标准马歇尔试件进行间接拉伸强度及疲劳试验,试件直径为101.6 mm±0.25 mm,高度为63.5 mm±1.3 mm。采用轮碾法成型车辙板试件,再将其切割为长度250 mm±5 mm、宽度50 mm±5 mm、厚度50 mm±5 mm的小梁试件,进行直接拉伸强度及疲劳试验。

## 1.5 试验设计

(1) 间接拉伸强度及疲劳试验。采用万能试验机进行间接拉伸强度及疲劳试验,万能试验机测试精度为±1%。在万能试验机上放置间接拉伸压条,将马歇尔试件放置于压条上,上下压条与试件直径位于同一条垂线上,与升降台垂直。强度与疲劳试验温度均为15℃,加载频率为10 Hz,强度试验加载速率为50 mm/min。疲劳试验采用应力控制模式,应力比S分别为0.2、0.3、0.4、0.5、0.6。

(2) 直接拉伸强度及疲劳试验。采用万能试验机进行直接拉伸强度及疲劳试验,采用环氧树脂将直接拉伸试件黏合在直接拉伸试验模具上,保证试件不产生偏心。试验温度为15℃,加载频率为10 Hz,强度试验加载速率为50 mm/min。疲劳试验采用应力控制模式,应力比S分别为0.2、0.3、0.4、0.5、0.6。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 强度特性

#### 2.1.1 间接拉伸强度

不同聚合物掺量下两种改性沥青混合料的间接拉伸强度试验结果见图2。

从图2可以看出:同一掺量下,A型与B型聚合物改性沥青混合料的间接拉伸强度高于SBS改性沥青混合料,其中B型聚合物改性沥青混合料强度提高22%~28%,掺量为5%时提升约28%;C型聚合物改性沥青混合料的间接拉伸强度略低于SBS改性沥青混合料。聚合物相同时,随着聚合物掺量的增加,改性沥青混合料的间接拉伸强度呈现先增大后减小的趋势,掺量为5%时改性沥青混合料的

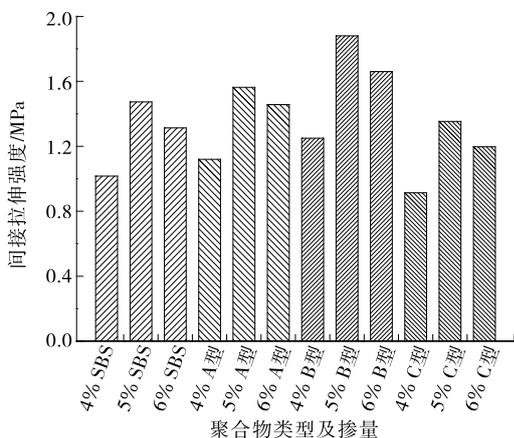


图2 聚合物改性沥青混合料间接拉伸强度试验结果

间接拉伸强度最高。

### 2.1.2 直接拉伸强度试验

不同聚合物掺量下两种改性沥青混合料的直接拉伸强度试验结果见图3。

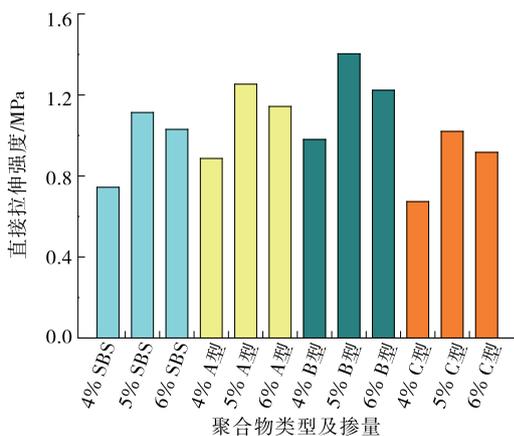


图3 聚合物改性沥青混合料直接拉伸强度试验结果

由图3可知:同一掺量下,A型与B型聚合物改性沥青混合料的直接拉伸强度高于SBS改性沥青混合料,其中B型聚合物改性沥青混合料的强度提高19%~32%,掺量为5%时提高约32%;C型聚合物改性沥青混合料的直接拉伸强度略低于SBS改性沥青混合料。聚合物相同时,随着聚合物掺量的增加,改性沥青混合料的直接拉伸强度变化呈现先增大后减小的趋势,掺量为5%时直接拉伸强度最高。

## 2.2 疲劳特性

根据上面的分析,聚合物掺量为5%时沥青混合料的间接拉伸强度和直接拉伸强度达到峰值。故采用掺量为5%的聚合物改性沥青开展间接拉伸疲劳试验与直接拉伸疲劳试验,探究沥青混合料的疲劳寿命N变化规律。

### 2.2.1 间接拉伸疲劳寿命

不同聚合物掺量下两种改性沥青混合料的间接拉伸疲劳寿命N试验结果见图4。

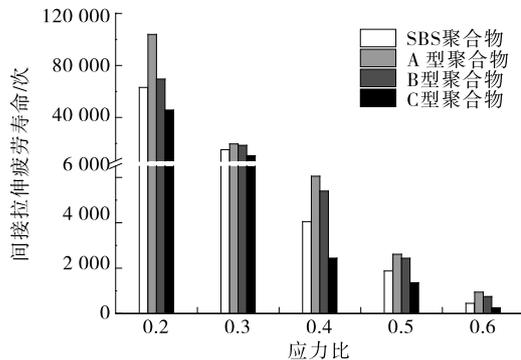


图4 聚合物改性沥青混合料间接拉伸疲劳寿命试验结果

从图4可以看出:4种聚合物改性沥青混合料的间接拉伸疲劳寿命存在较大差异,A型和B型聚合物改性沥青混合料的间接拉伸疲劳寿命高于SBS改性沥青混合料,SBR掺配比例为75%时,间接拉伸疲劳寿命提高35%~55%;C型聚合物改性沥青混合料的间接拉伸疲劳寿命略低于SBS改性沥青混合料。

采用S-N疲劳方程[见式(1)]将间接拉伸疲劳寿命N<sub>f</sub>与应力比S在双对数坐标中进行拟合,拟合结果见图5,拟合参数见表3。

$$N_f = k(1/S)^n \tag{1}$$

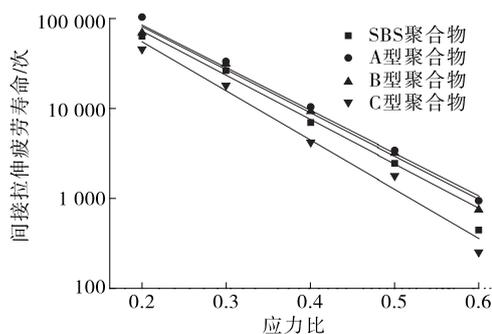


图5 不同类型聚合物改性沥青混合料间接拉伸疲劳寿命与应力比的拟合结果

表3 不同类型改性沥青混合料间接拉伸疲劳寿命与应力比的拟合参数

聚合物类型	k	n	R <sup>2</sup>
SBS 聚合物	93.983 13	4.131 27	0.947 59
A 型聚合物	138.566 95	3.987 21	0.945 84
B 型聚合物	124.157 83	4.029 99	0.928 93
C 型聚合物	34.341 27	4.587 54	0.908 25

从图 5、表 3 可以看出:4 种聚合物改性沥青混合料的间接拉伸疲劳寿命与应力比在双对数坐标系中表现出良好的线性相关关系, $R^2$  值均超过 0.90。随着复合聚合物中 SBR 掺配比例的增加,改性沥青混合料的间接拉伸疲劳寿命增长,说明提高复合聚合物中 SBR 掺配比例有助于改善沥青混合料的疲劳寿命。参数  $n$  能反映改性沥青混合料的应力敏感性, $n$  值的大小排序为 A 型聚合物改性沥青混合料<B 型聚合物改性沥青混合料<SBS 改性沥青混合料<C 型聚合物改性沥青混合料,A 型聚合物改性沥青混合料的应力敏感性最低。

### 2.2.2 直接拉伸疲劳寿命

不同聚合物掺量下两种改性沥青混合料直接拉伸疲劳寿命试验结果见图 6,直接拉伸疲劳寿命与应力比的拟合结果见图 7,拟合参数见表 4。

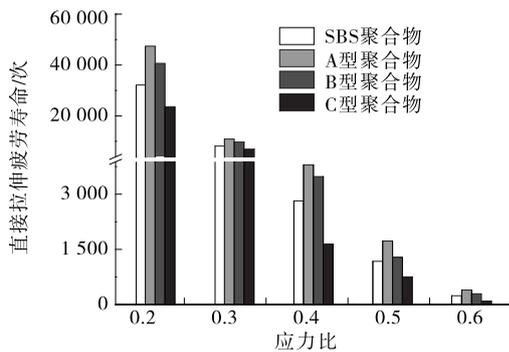


图 6 聚合物改性沥青混合料直接拉伸疲劳寿命试验结果

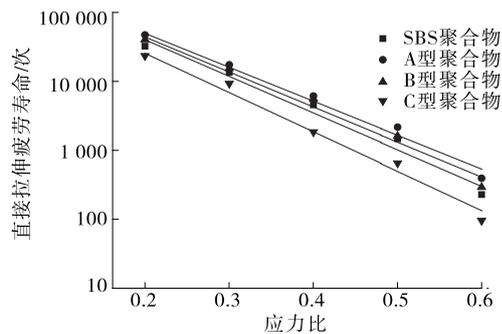


图 7 不同类型聚合物改性沥青混合料直接拉伸疲劳寿命与应力比的拟合结果

表 4 不同类型聚合物改性沥青混合料直接拉伸疲劳寿命与应力比的拟合参数

聚合物类型	$k$	$n$	$R^2$
SBS 聚合物	30.289 47	4.465 06	0.855 12
A 型聚合物	64.450 20	4.130 92	0.914 57
B 型聚合物	46.023 28	4.264 54	0.894 99
C 型聚合物	11.451 42	4.789 72	0.896 76

从图 6 可以看出:4 种聚合物改性沥青混合料的直接拉伸疲劳寿命的变化趋势与间接拉伸疲劳寿命相似。复合聚合物中 SBR 掺配比例为 50% 或 75% 时,直接拉伸疲劳寿命高于 SBS 改性沥青混合料;SBR 掺配比例达到 75% 时,直接拉伸疲劳寿命提升 30%~45%。C 型聚合物改性沥青混合料的直接拉伸疲劳寿命低于 SBS 改性沥青混合料。

从图 7、表 4 可以看出:4 种聚合物改性沥青混合料的直接拉伸疲劳寿命与应力比存在较好的线性关系, $R^2$  值均超过 0.85。随着复合聚合物中 SBR 掺配比例的增加,改性沥青混合料的直接拉伸疲劳寿命得到改善;A 型聚合物改性沥青混合料的应力敏感性最低,应力敏感性由高到低为 C 型聚合物改性沥青混合料>SBS 改性沥青混合料>B 型聚合物改性沥青混合料>A 型聚合物改性沥青混合料;与间接拉伸疲劳寿命相比,直接拉伸疲劳寿命的应力敏感性略高。

## 3 结论

对 3 种不同组合比例的 SBR/PP 复合聚合物及 SBS 改性沥青混合料开展强度和疲劳性能试验,得出以下结论:

(1) 聚合物改性沥青混合料中聚合物掺量对间接拉伸强度与直接拉伸强度影响显著,4 种聚合物改性沥青混合料的聚合物最佳掺量均为 5%。

(2) SBR 掺配比例为 50% 的 SBR/PP 复合改性沥青混合料的直接拉伸强度与间接拉伸强度高于其他 3 种聚合物改性沥青混合料,5% 掺量下,相较于 SBS 改性沥青混合料,其间接拉伸强度与直接拉伸强度分别提高 28%、32%。

(3) 最佳掺量下,随 SBR 掺配比例的增加,SBR/PP 复合聚合物改性沥青混合料的间接拉伸疲劳寿命和直接拉伸疲劳寿命均增加,SBR 掺配比例为 75% 时间接拉伸疲劳寿命和直接拉伸疲劳寿命相比于 SBS 改性沥青混合料提高约 40%。

(4) 4 种聚合物改性沥青混合料疲劳性能对应力的敏感性大小为 C 型聚合物改性沥青混合料>SBS 改性沥青混合料>B 型聚合物改性沥青混合料>A 型聚合物改性沥青混合料,建议采用 5% 掺量的 A 型复合聚合物改善沥青混合料的强度及疲劳特性。

(下转第 86 页)

[2] FAUCON P, LE BESCOP P, ADEONT F, et al. Leaching of cement; Study of the surface layer[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(11): 1707-1715.

[3] FAUCON P, ADEONT F, JACQUINOT J F, et al. Long-term behaviour of cement pastes used for nuclear waste disposal; Review of physico-chemical mechanisms of water degradation[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(6): 847-857.

[4] 李响. 复合水泥基材料水化性能与浆体微观结构稳定性[D]. 北京: 清华大学, 2010.

[5] 何绍丽. 软水条件下矿物掺合料混凝土溶蚀性能的实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.

[6] 孙海燕. 从微结构形成与劣化机理研究水工混凝土粉煤灰临界掺量[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.

[7] 方正青, 汤玉娟, 何绍丽, 等. 粉煤灰对水泥基材料溶蚀性能的影响[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(9): 9-13.

[8] ROZIÈRE E, LOUKILI A, EL HACHEM R, et al. Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(12): 1188-1198.

[9] 陈朋, 惠冰, 孟凌霄, 等. 粉煤灰基气泡轻质土配合比和抗压强度研究[J]. 公路与汽运, 2022(5): 47-49.

[10] 陈洪根, 龙蔚莹, 李昕, 等. 基于 BP 神经网络的粉煤灰混凝土抗压强度预测研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 2): 1041-1045.

[11] PARICHATPRECHA R, NIMITYONGSKUL P. Analysis of durability of high performance concrete using artificial neural networks[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 910-917.

[12] BAL L, BUYLE-BODIN F. Artificial neural network for predicting drying shrinkage of concrete[J]. Construction & Building Materials, 2013, 38: 248-254.

[13] 赵明亮, 水中和, 周华新, 等. 中低强度等级混凝土抗压强度的 BP 神经网络模型预测研究[J]. 混凝土, 2021(3): 35-38.

[14] 金浏, 赵瑞, 杜修力. 混凝土抗压强度尺寸效应的神经网络预测模型[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(3): 260-268.

[15] 史俊杰. 水泥稳定碎石材料钙溶蚀规律研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.

[16] 何玉彬, 李新忠. 神经网络控制技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

收稿日期: 2022-07-28

\*\*\*\*\*

(上接第 71 页)

参考文献:

[1] 程培峰, 佟天宇. 回收 PP/SBR 复合改性沥青的制备及性能[J]. 现代塑料加工应用, 2019, 31(5): 16-20.

[2] 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): 103-107.

[3] 彭伟. SBS/橡胶粉复掺改性沥青性能试验研究[J]. 福建交通科技, 2020(5): 21-24.

[4] WANG W, TAN G, LIANG C, et al. Study on viscoelastic properties of asphalt mixtures incorporating SBS polymer and basalt fiber under freeze-thaw cycles[J]. Polymers, 2020, 12(8): 1804.

[5] 何志俊. SBS/橡胶粉复合改性沥青高温性能研究[J]. 山西交通科技, 2020(3): 8-9+16.

[6] VAMEGH M, AMERI M, NAENI S F C. Experimental investigation of effect of PP/SBR polymer blends on the moisture resistance and rutting performance of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119197.

[7] 刘梦梅, 韩森, 任万艳, 等. 橡胶和 SBS 对排水沥青混合料性能影响的试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(3): 269-274.

[8] MANSOURKHAHI A, AMERI M, DARYAEE D. Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2019, 203: 83-94.

[9] 勾俊芳, 韩森, 杨晓飞, 等. 废胶粉对热拌沥青混合料疲劳性能的影响[J]. 中外公路, 2017, 37(2): 241-245.

[10] 魏斌. 基于橡胶粉与 SBS 复合改性技术钢桥面铺装沥青混合料耐久性试验研究[J]. 公路工程, 2015, 40(5): 101-106+140.

[11] AMERI M, VAMEGH M, ROOHOLAMINI H, et al. Investigating effects of nano/SBR polymer on rutting performance of binder and asphalt mixture[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 1-7.

[12] 向丽. 废橡胶粉/SBS 复合改性沥青的机理和性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.

[13] 程培峰, 佟天宇. 废旧 PP 复配 SBR 改性沥青及其混合料性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(10): 927-933.

[14] 刘滢, 金云东, 周超, 等. SBR/PP 复合颗粒改性沥青及其混合料性能研究[J]. 应用化工, 2022, 51(1): 93-97+102.

收稿日期: 2022-11-07