

# 废胶粉复合改性沥青制备与性能研究<sup>\*</sup>

吴水辉<sup>1</sup>, 张登科<sup>2</sup>, 王辉<sup>2</sup>

(1.江苏新越高新技术(集团)股份有限公司, 江苏 镇江 212009;

2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**以剪切速率、剪切温度、剪切时间和发育时间为影响因素进行正交试验,以软化点、延度、软化点差和弹性恢复作为评价指标进行极差分析,研究不同工艺参数对废胶粉复合改性沥青性能的影响,推荐废胶粉复合改性沥青的制备工艺为剪切速度 5 000 r/min、剪切温度 185 ℃、剪切时间 30 min、发育时间 50 min;采用上述工艺参数制备废胶粉复合改性沥青与普通胶粉改性沥青和 SBS 改性沥青进行性能对比试验,结果表明,废胶粉复合改性沥青的高低温流变性能更好,储存稳定性也得到较大改善,能满足高温多雨地区对沥青胶结料的性能要求和工厂化生产的要求。

**关键词:**公路;废胶粉;改性沥青;制备工艺;路用性能

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)01-0055-05

胶粉改性沥青路面具有良好的耐久性和抗裂性能,可显著提升沥青路面的使用性能和使用寿命<sup>[1-3]</sup>。胶粉改性沥青中的废胶粉主要采用废旧轮胎加工而成,可促进废旧轮胎的回收再利用,在生态环保、资源节约等方面具有优势<sup>[4]</sup>。但生产轮胎的橡胶通常经过硫化工艺处理,使废胶粉具有较稳定的三维网状结构,活性不足,导致胶粉与沥青间相容性较差,且胶粉易团聚<sup>[5-7]</sup>,造成当前胶粉改性沥青普遍存在易离析、储存稳定性较差等不足,给胶粉改性沥青的工厂化生产带来不便。研究表明,普通胶粉经过一定工艺技术手段脱硫,即断开胶粉中的 S—S 键、S—C 键等后,可生成更多的活性基团来提升其活性,制备的脱硫胶粉改性沥青不仅可改善储存稳定性,还具备较好的高、低温性能<sup>[8-12]</sup>。为此,本文采用化学助剂对胶粉进行活化,通过正交试验探究不同工艺条件对废胶粉复合改性沥青性能的影响,提出优化的制备工艺,提升废胶粉复合改性沥青的综合性能。

## 1 原材料

选用 70<sup>#</sup> A 级基质沥青,其主要技术指标(见表 1)满足规范要求。

采用 30 目废胶粉,经检测,其技术指标均符合 JT/T 797—2019 的要求。胶粉用量为 23%。添加

表 1 70<sup>#</sup> A 级沥青的主要性能检测结果

性能指标	检测结果	技术要求
针入度/(0.1 mm)	71	60~80
软化点/℃	51	≥46
10 ℃延度/cm	32	≥20
15 ℃延度/cm	>100	≥100
含蜡量/%	1.3	≤2.2
RTFOT 后 质量损失/%	0.15	±0.8
残留物 残留针入度比/%	71	≥61
10 ℃残留延度/cm	16	≥6

提升胶粉渗透扩张性能的软化剂妥尔油、提高胶粉脱硫降解效率的活化剂 B—450、通过交联反应提高废胶粉改性沥青储存稳定性的交联剂硫黄稳定剂,参考助剂厂商的推荐剂量确定改性剂掺量,分别为软化剂 2%、活化剂 2.5%、硫黄稳定剂 2%。

## 2 废胶粉复合改性沥青的制备工艺

为减少试验量,采用四因素和三水平正交试验设计废胶粉复合改性沥青制备试验方案,其中:剪切速率取 4 000 r/min、5 000 r/min、6 000 r/min 3 个水平,剪切温度取 175 ℃、185 ℃、195 ℃ 3 个水平,剪切时间取 20 min、30 min、40 min 3 个水平,发育时间取 30 min、40 min、50 min 3 个水平,得到的 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交试验表见表 2。

<sup>\*</sup> 基金项目:长沙市自然科学基金资助项目(kq2202205);湖南省交通运输厅科技进步与创新项目计划(201825;B202112)

表 2 制备工艺的正交试验方案及试验结果

试验号	剪切速度(Ⅰ)/ (r·min <sup>-1</sup> )	剪切温度 (Ⅱ)/℃	剪切时间 (Ⅲ)/min	发育时间 (Ⅳ)/min	软化点/℃	5℃延度/ cm	弹性恢复/ %	软化点差/ ℃
1	4 000	175	20	30	69.4	12.5	73.6	3.2
2	4 000	185	30	40	72.1	13.9	78.3	2.6
3	4 000	195	40	50	71.8	12.7	79.6	2.6
4	5 000	175	30	50	74.2	13.1	84.5	2.5
5	5 000	185	40	30	75.7	15.1	88.9	2.2
6	5 000	195	20	40	73.1	13.9	84.7	2.2
7	6 000	175	40	40	67.6	12.4	82.2	2.7
8	6 000	185	20	50	70.3	13.2	84.0	2.4
9	6 000	195	30	30	69.6	12.7	80.5	2.3

由于胶粉改性沥青易离析、稳定性差,且高温性能提高幅度有限,以软化点、5℃延度、弹性恢复和软化点差为评价指标,分析废胶粉复合改性沥青合适的制备工艺,测试结果见表 2。对测试结果采用极差分析法进行分析,得到各因素在不同水平下对评价指标的影响(见图 1),同时计算各评价指标在

不同因素和水平下的极差值及相对极差(见图 2)。

对于软化点,由 1(a)和 2(a)可知:剪切速度的极差值远大于其他因素,剪切速度对软化点的影响最大,其他因素的影响程度依次为剪切温度、发育时间和剪切时间;剪切速度、剪切温度和剪切时间在水平二时平均软化点最高,发育时间在水平三时软化

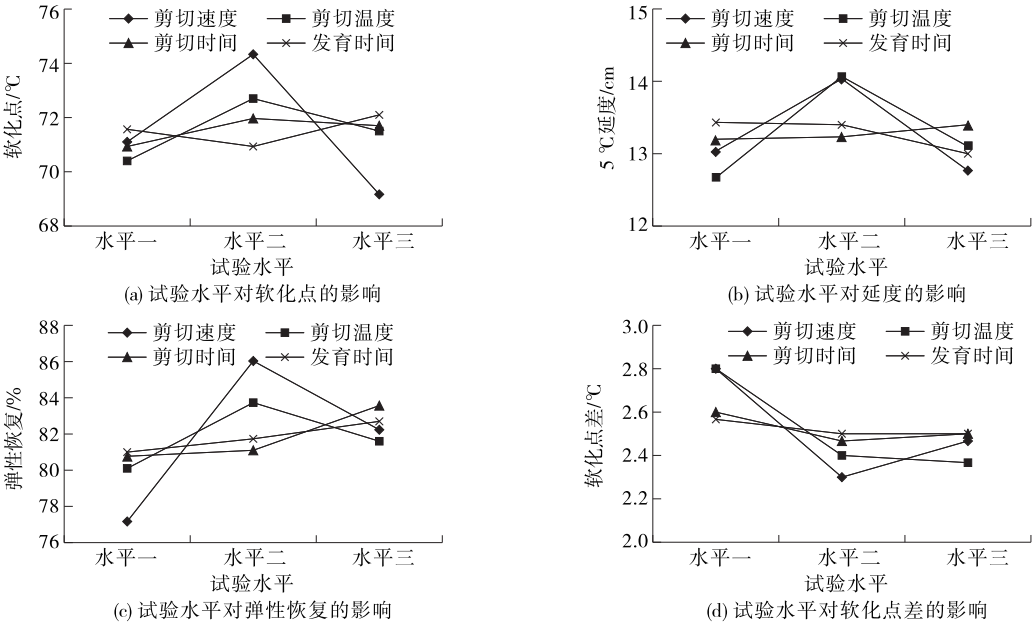


图 1 各因素在不同水平下对评价指标的影响

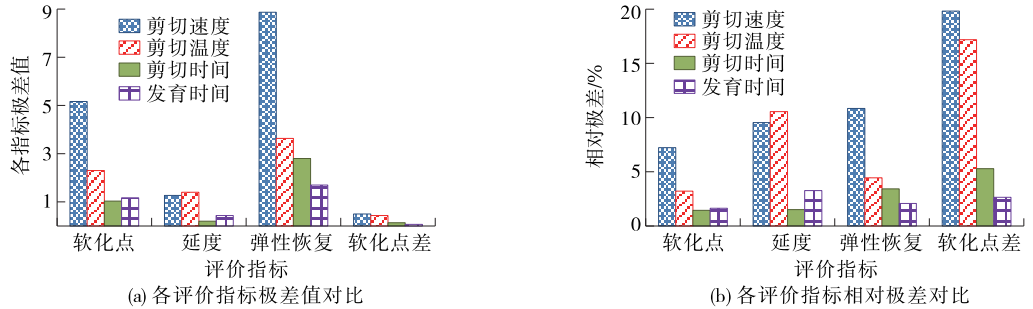


图 2 极差分析结果

点最好。根据软化点极差分析结果得到废胶粉复合改性沥青的制备工艺组合为 I<sub>2</sub> II<sub>2</sub> III<sub>2</sub> IV<sub>3</sub>。

对于延度,由 1(b)和 2(a)可知:剪切速度和剪切温度的极差值大于其他因素,剪切速度和剪切温度对延度的影响最大,其他依次为发育时间和剪切时间;剪切速度、剪切温度和发育时间在水平二时平均延度最高,剪切时间在水平三时延度最好。根据延度极差分析结果得到的废胶粉复合改性沥青的制备工艺组合为 I<sub>2</sub> II<sub>2</sub> III<sub>3</sub> IV<sub>2</sub>。

对于弹性恢复,由 1(c)和 2(a)可知:剪切速度的极差值大于其他因素,剪切速度对弹性恢复的影响最大,其他因素的影响程度依次为剪切温度、剪切时间和发育时间;剪切速度和剪切温度在水平二时平均弹性恢复最好,发育时间和剪切时间在水平三时平均弹性恢复最好。根据弹性恢复极差分析结果得到的废胶粉复合改性沥青的制备工艺组合为 I<sub>2</sub> II<sub>2</sub> III<sub>3</sub> IV<sub>3</sub>。

对于软化点差,由 1(d)和 2(a)可知:剪切速度和剪切温度的极差值大于其他因素,剪切速度和剪切温度对软化点差的影响最大,其他因素依次为剪切时间和发育时间;剪切速度在水平二时平均软化点差最小,剪切温度、发育时间和剪切时间在水平三时平均软化点差最小。根据软化点差极差分析结果得到的废胶粉复合改性沥青的制备工艺组合为 I<sub>2</sub> II<sub>3</sub> III<sub>3</sub> IV<sub>3</sub>。

由图 2 可知:剪切速度和剪切温度对各评价指标的影响最大,是主要因素,而剪切时间和发育时间的影响较小。在影响水平上,各评价指标在剪切速度和剪切温度的水平二时最好,发育时间以水平三

为主导,剪切时间则有些指标在水平二、有些指标在水平三;因剪切时间为次要因素,水平二和水平三时指标值差异不明显,综合考虑加工的时效性,剪切时间取水平二。综上,推荐废胶粉复合改性沥青的制备工艺为剪切速度 5 000 r/min、剪切温度 185 ℃、剪切时间 30 min、发育时间 50 min。

3 废胶粉复合改性沥青的性能分析

按照推荐的工艺参数制备废胶粉复合改性沥青,测试其基本性能,采用 SHRP 胶结料规范中的高温动态剪切流变试验与低温弯曲梁流变试验对其高、低温性能进行评价,并与普通胶粉改性沥青和 SBS 改性沥青进行性能对比。

3.1 基本性能

废胶粉复合改性沥青的基本性能测试结果见表 3,与普通胶粉改性沥青和 SBS 改性沥青主要性能指标的比较见图 3。

表 3 废胶粉复合改性沥青的主要性能检测结果

指标	检测结果	技术要求
针入度/(0.1 mm)	46	40~60
软化点/℃	74.5	≥60
5 ℃延度/cm	16.2	≥20
软化点差/℃	2.2	≤2.2
弹性恢复/%	85.8	≥75
180 ℃旋转黏度/(Pa·s)	2.16	2~4
质量损失/%	-0.12	±1
RTFOT 后		
残留物		
残留针入度比/%	82	≥65
5 ℃残留延度/cm	15.4	≥15

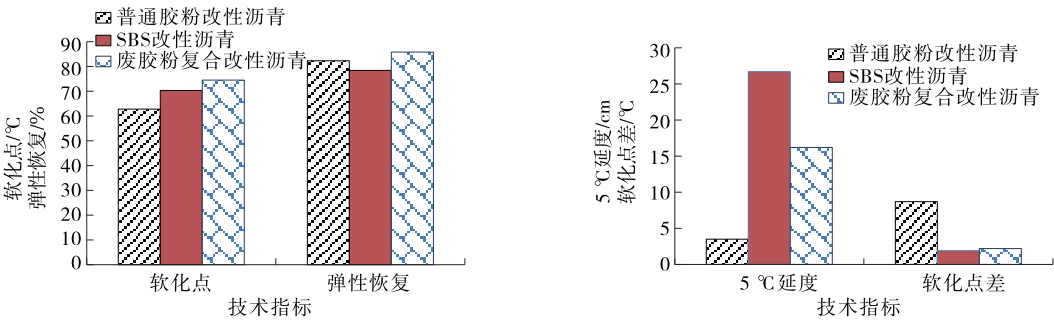


图 3 不同沥青的主要技术指标对比

由表 3 和图 3 可知:废胶粉复合改性沥青的技术性能优于普通胶粉改性沥青,基本上可达到 I—D 级 SBS 改性沥青的水平,特别是其高温性能和稳定性得到大幅提升,且经 RTFOT 老化后技术指标下

降不明显,表明废胶粉复合改性沥青具有很好的抗老化能力;废胶粉复合改性沥青在高温性能和弹性性能方面高于一般 SBS 改性沥青,储存稳定性与 SBS 改性沥青相当。

### 3.2 高温流变性能分析

SHRP 规范用车辙因子  $G^*/\sin\delta$  表征沥青混合料的抗车辙能力,  $G^*/\sin\delta$  愈大, 混合料抗车辙性能愈好; 相位角  $\delta$  表征沥青中黏性与弹性成分的比例, 相位角越大, 沥青的黏性成分越多。采用温度扫描模式对废胶粉复合改性沥青、普通胶粉改性沥青和 SBS 改性沥青进行复数模量  $G^*$  和相位角  $\delta$  测定, 并计算车辙因子  $G^*/\sin\delta$  来评价其高温抗车辙性能。相位角测试结果见图 4, 车辙因子计算结果见图 5。

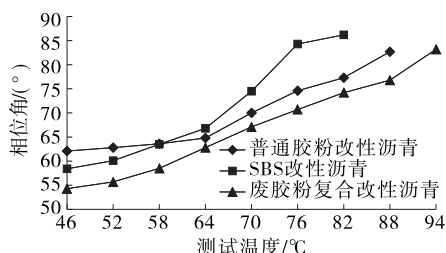


图4 不同沥青相位角测试结果

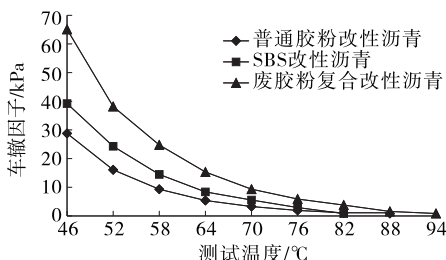


图5 不同沥青车辙因子测试结果

由图 4 可知: 随着温度的升高, 各种沥青的相位角  $\delta$  都增大, 说明沥青从弹性逐步转化为黏性, 弹性性能愈来愈差, 抗变形能力也变差; 3 种改性沥青的相位角从大到小排序为普通胶粉改性沥青、SBS 改性沥青和废胶粉复合改性沥青, 废胶粉复合改性沥青的弹性性能最强, 高温抗变形能力较好, 由简单胶粉改性变为复合改性后有效提升了改性沥青的弹性性能, 高温抗变形能力得到有效改善。

由图 5 可知: 在 46~94℃ 温度扫描时, 随着温度的升高, 3 种沥青的车辙因子  $G^*/\sin\delta$  大幅度减小, 按照原样沥青的  $G^*/\sin\delta$  不小于 1.0 kPa 得到 3 种改性沥青的失效温度分别为废胶粉复合改性沥青 92.8℃、SBS 改性沥青 81.5℃、普通胶粉改性沥青 84.3℃; 3 种改性沥青在同一温度下的车辙因子从大到小排序为废胶粉复合改性沥青、SBS 改性沥青和普通胶粉改性沥青, 废胶粉复合改性沥青远高于其他沥青。说明在改善高温性能和提升抗车辙能力

方面, 经助剂改性后的胶粉复合改性沥青明显优于普通胶粉改性沥青, 且不劣于 SBS 改性沥青。综上, 胶粉复合改性沥青具有更好的高温流变性能和更强的高温抗变形能力。

### 3.3 低温弯曲蠕变性能分析

SHRP 规范采用弯曲蠕变试验得到低温弯曲蠕变劲度模量  $S$  和蠕变速率  $m$  来评价沥青的低温性能。  $S$  值越大, 沥青越脆, 路面越易开裂; 蠕变速率  $m$  越大, 沥青对低温应力变形的响应越快, 开裂破坏的可能性越小。3 种沥青的低温弯曲蠕变劲度模量  $S$  测试结果见图 6, 蠕变速率  $m$  测试结果见图 7。

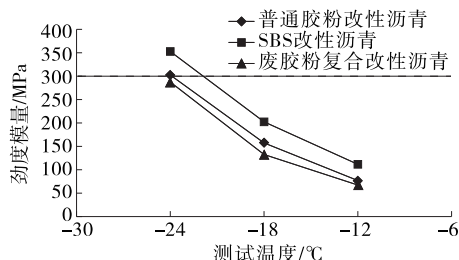


图6 沥青低温弯曲蠕变劲度模量测试结果

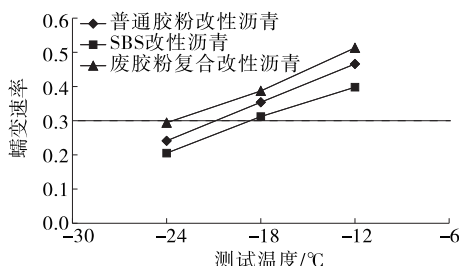


图7 沥青蠕变速率测试结果

由图 6、图 7 可知: 随着温度的下降, SBS 改性沥青劲度模量的增幅大于 2 种胶粉改性沥青, 废胶粉复合改沥青劲度模量的增幅最小; 蠕变速率方面, 各测试温度下, 废胶粉复合改性沥青的蠕变速率都最大。低温条件下胶粉复合改性沥青比其他 2 种改性沥青具有更小的劲度模量和更大的蠕变速率, 表明低温下胶粉复合改性沥青的弹性成分最大, 变形响应迅速, 开裂的可能性下降。废胶粉在化学助剂的作用下促进了胶粉的溶胀降解, 进而使废胶粉中的橡胶成分得到更多释放, 改进了沥青的柔性性能, 提升了胶粉复合改性沥青的低温抗裂性能。低温抗裂性能从大到小排序为废胶粉复合改性沥青、普通胶粉改性沥青和 SBS 改性沥青。

## 4 结论

(1) 以剪切速率、剪切温度、剪切时间和发育时



间为影响因素,设计四因素三水平的废胶粉复合改性沥青制备工艺正交试验,选择反映沥青高低温性能的软化点、5℃延度、反映沥青储存稳定性的软化点差和弹性恢复作为评价指标进行极差分析,结合评价指标的重要性和经济性,经综合对比分析,推荐废胶粉复合改性沥青的制备工艺为剪切速度 5 000 r/min、剪切温度 185℃、剪切时间 30 min、发育时间 50 min。

(2) 废胶粉复合改性沥青的基本性能满足 I—D 级 SBS 改性沥青的要求,表现出更好的高低温流变性能,储存稳定性也表现优良,能满足高温多雨地区对沥青胶结料的性能要求和工厂化生产的要求。

#### 参考文献:

- [1] 王辉,周争辉,詹诗浩,等.废胶粉/SBS 复合改性沥青混合料 CR/SHMA—13 的级配研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(3):1—7.
- [2] 王淋,郭乃胜,温彦凯,等.几种改性沥青疲劳破坏评价指标及性能研究[J].土木工程学报,2020,53(1):118—128.
- [3] 王淋,郭乃胜,温彦凯,等.改性沥青疲劳破坏判定指标适用性[J].交通运输工程学报,2020,20(4):91—106.
- [4] 张明,吴俊青,刘俊亮.废弃橡胶胶粉化工艺及胶粉再生利用研究进展[J].橡胶工业,2020,67(1):3—9.
- [5] 王辉,王旭,黄威麟,等.废胶粉复合改性沥青相容性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(10):3879—3889.
- [6] 杨小龙.基于原材料特性的橡胶沥青改性机理研究[D].兰州:兰州交通大学,2015.
- [7] 夏娟,吴旷怀,凌宏杰.脱硫过程对废胶粉改性沥青粘度的影响[J].石油沥青,2009,23(3):21—24.
- [8] 何亮,黄晓明,马育,等.橡胶改性沥青储存稳定性试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(5):1086—1091.
- [9] 王辉,熊梦日,杨震.基于化学改性的废胶粉复合改性沥青性能与机理研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,38(6):30—37.
- [10] 何兆益,危接来,吴宏宇,等.废胎胶粉改性沥青性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2009,28(6):1025—1027.
- [11] 肖建军,邱祖民,周伟,等.废旧橡胶脱硫再生及其在塑料中的应用研究进展[J].化工新型材料,2015,43(4):223—226.
- [12] 周志刚,蔡扬发,谭军.聚酯纤维对橡胶改性沥青混凝土性能的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(2):1—8.

收稿日期:2022—07—22

\*\*\*\*\*

## 长沙理工大学简介

长沙理工大学是一所以工为主,工、理、管、经、文、法、哲、艺等多学科协调发展,以本科、研究生教育为主体,具有博士后科研流动站、博士学位授予权和硕士生推免权的多科性大学。是全国先进基层党组织、国家“中西部高校基础能力建设工程”高校、首批全国“创新创业典型经验高校”50 强、湖南省“国内一流大学建设高校”(A 类)、湖南省文明标兵单位、湖南省依法治校示范学校。是“卓越工程师教育培养计划”试点学校、教育部“大学生创新性实验计划”项目实施学校。

设有 22 个教学学院、1 个独立学院、1 个继续教育学院、85 个本科专业,其中国家级一流本科专业建设点 43 个、国家级特色专业 9 个、通过国家工程教育专业认证的专业 14 个、中外合作办学本科教育项目 3 个。拥有国家级和省级教学团队 3 个,国家级一流本科课程、双语教学示范课程等 10 门,省级一流本科课程 101 门,国家级实践教学平台 12 个,省级实践教学与创新教育平台 59 个。现有专任教师 2 000 余人,其中正高职称 300 余人,副高职称 600 余人。拥有中国工程院院士、“长江学者奖励计划”特聘教授等国家级人才 30 余人;30 余人享受国务院政府特殊津贴专家、国家有突出贡献中青年专家、国家级教学名师等国家级荣誉称号;拥有“全国高校黄大年式教师团队”2 个,中宣部宣传思想文化青年英才、教育部“新世纪优秀人才支持计划”人选、交通部“交通青年科技英才”和湖南省科技领军人才、“芙蓉学者”等省部级人才 400 余人。

拥有湖南省国内一流建设(培养)学科 6 个,5 个学科进入 ESI 全球排名前 1%;现有博士后科研流动站 5 个、一级学科博士学位授权点 8 个、博士专业学位授权点 1 个、一级学科硕士学位授权点 29 个、硕士专业学位授权点 18 个,具有授予同等学力硕士学位资格。拥有国家科学技术进步一等奖等标志性科研成果。现有国家级科研平台 4 个,省部级创新团队 13 个、自然科学科研平台 46 个、哲学社会科学研究基地 22 个。