

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.02.011

高黏度弹性恢复沥青的制备与性能研究

孙波

(湖南交通国际经济工程合作有限公司, 湖南 长沙 410029)

摘要: 为制备高黏度弹性恢复沥青, 高效利用废弃物降低工程造价, 采用橡胶粉(CR)和布敦岩沥青(RA)替代部分 SBS 改性剂, 制备 5 种不同改性剂掺量的高黏度弹性恢复沥青, 通过常规性能和流变性能试验评价其弹性恢复能力、黏韧性和高低温性能。结果表明, 橡胶粉和布敦岩沥青可显著提高沥青的软化点、黏度、黏韧性和弹性恢复能力, 增强沥青的抗塑性变形能力, 较好的黏韧性可增强沥青的弹性和拉伸能力, 使沥青具有较好的抗冲击能力; 橡胶粉和布敦岩沥青可显著提高沥青的车辙因子, 增强沥青的高温性能和抵抗剪切荷载的能力; 与基质沥青相比, 高黏度弹性恢复沥青的低溫流变性能明显提升, $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的低溫流变性能满足要求; 高黏度弹性恢复沥青的最佳配比为 SBS 掺量 3%、RA 掺量 10%、CR 掺量 15%、稳定剂掺量 0.2%。

关键词: 公路; 高黏度弹性恢复沥青; 橡胶粉(CR); 布敦岩沥青(RA); 黏弹性; 流变性能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)02-0049-04

沥青的黏弹性能与路面结构破坏密切相关, 对路面使用性能和服役寿命有重要影响。为防止高温下沥青路面在重载交通作用下产生变形, 并保持路面结构的稳定性, 沥青必须具有较高的黏度^[1]。重载交通的增加也对沥青的黏度和弹性恢复能力提出了更严格的要求^[2-3]。与单掺 SBS 改性剂的改性沥青相比, 采用 SBS、增塑剂和多聚磷酸等制备的高黏度沥青的高温性能、水稳定性和抗变形能力更好^[4]。王卫雷等的研究表明增加胶粉可使沥青的劲度模量下降, 蠕变速率增加, 低温性能提升, 应力消散能力也有所增强。豆怀兵等的研究表明胶粉可改善沥青的感温性和高温抗变形能力, 但改性沥青的变形恢复能力变差, 路面易开裂。黄卫东等认为稳定剂能大幅度改善高黏度沥青的性能, 但稳定剂含量增加对性能的提升有限。熊梦日等采用 SBS 改性剂和稳定剂制备废胶粉复合改性沥青, 提出其最佳制备工艺参数为剪切温度 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、剪切时间 30 min、SBS 改性剂掺量 1%、稳定剂掺量 0.5%^[8]。由于 SBS 改性沥青的成本较高、加工困难, 极大阻碍了高黏度沥青的应用。为降低道路工程造价并高效利用废弃橡胶, 使道路工程更加经济、环保, 本文使用废旧轮胎橡胶粉(CR)、布敦岩沥青(RA)替代部分 SBS 改性剂制备不同改性剂掺量的高黏度弹性恢复沥青, 研究 CR 和 RA 对高黏度弹性恢复沥青物理性能和流变性能的影响, 为制备高黏度弹性

恢复沥青提供参考。

1 改性沥青制备与试验方案

1.1 原材料

选用湖南长沙扬子公司生产的基质沥青, 按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[9] 对其进行性能测试, 结果见表 1。SBS 改性剂选用中国石化集团巴陵石化有限责任公司生产的 YH-792 SBS。橡胶粉粒径为 60 目, 产自河北瑞诚矿业有限公司。布敦岩沥青为灰黑色粉末, 性能稳定, 具有优良的路用性能。稳定剂为灰色细粉末, 活性成分为 99%。沥青改性剂的技术指标见表 2。

表 1 基质沥青的性能指标

项目	检测结果
针入度/(0.1 mm)	68
软化点/ $^{\circ}\text{C}$	47.3
延度($10\text{ }^{\circ}\text{C}$)/cm	72.1
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.04
闪点/ $^{\circ}\text{C}$	265
黏度($135\text{ }^{\circ}\text{C}$)/(Pa $\cdot\text{s}$)	1.42

1.2 改性沥青的制备

采用 SBS、橡胶粉、布敦岩沥青及稳定剂等制备高黏度弹性恢复沥青, 通过试验研究, 确定 SBS 掺量为 3%, 布敦岩沥青和橡胶粉掺量分别为 6%~10%、10%~15%, 稳定剂掺量为 0.2% (均为与高黏

度弹性恢复沥青的质量比)。制备5种不同改性剂掺量的高黏度弹性恢复沥青,以在基质沥青中掺加0.2%稳定剂的沥青作为对比(见表3)。

表2 改性剂的性能指标

改性剂种类	项目	检测结果
SBS	嵌段比	30/70
	拉伸强度/MPa	>18
	灰分/%	<0.2
	伸长率/%	>700
橡胶粉	相对密度	1.16
	灰分/%	4.26
	橡胶烃含量/%	58.7
	炭黑含量/%	36.4
布敦岩沥青	沥青含量/%	23.6
	密度/(g·cm ⁻³)	1.72
	含水率/%	0.92
	三氯乙烯溶解度/%	25.63

表3 不同类型沥青的配比

沥青编号	SBS 掺量/%	RA 掺量/%	CR 掺量/%	稳定剂掺量/%
1	0	0	0.0	0.2
2	3	10	10.0	0.2
3	3	10	12.5	0.2
4	3	10	15.0	0.2
5	3	8	15.0	0.2
6	3	6	15.0	0.2

由于各种改性剂的相容性不同,制备过程中应充分考虑改性剂的添加顺序、制备温度和搅拌速度。制备工艺如下:1)将基质沥青在135℃烘箱中加热2 h,使其具有良好的流动性。2)将一定质量的岩沥青加入基质沥青中,用玻璃棒搅拌10 min,使其混合均匀。3)将烘箱温度升至180℃,加入一定质量的SBS和橡胶粉,采用叶轮式搅拌器以1 000 r/min的转速搅拌15 min,使改性剂颗粒均匀分散在沥青中。4)加入稳定剂,采用高速剪切仪以4 000 r/min的转速搅拌45 min,并保持沥青温度为180℃。5)在160℃烘箱中保温2 h,使橡胶粉在沥青中完成溶胀,获得高黏度弹性恢复沥青(表3中2#~6#沥青)。为避免稳定剂和制备过程对沥青性能的影响,在基质沥青中掺加0.2%稳定剂,按上述流程制备改性沥青(表3中1#沥青),作为对比分析对象。

1.3 试验方案

对6种沥青进行常规性能试验和流变性能试验,常规性能试验包括针入度、软化点、延度、动力黏度、弹性恢复和黏韧性试验,流变试验包括动态剪切流变试验(DSR)和低温弯曲梁流变试验(BBR)。其中:延度试验条件为5℃;动力黏度试验采用真空减压毛细管法,在60℃时测量沥青的动力黏度;黏韧性试验使用数码延度仪在25℃的水浴中进行,以5 cm/min的拉伸速率将试件拉至10 cm时剪断试样的中间部位,1 h后测量试样的长度,计算弹性恢复率;低温弯曲梁流变试验分别在-12℃、-18℃、-24℃下进行。为减小误差,所有试验进行3次平行试验,取平均值作为试验结果。

2 试验结果与分析

2.1 常规性能

2.1.1 针入度、软化点和延度

6种沥青的针入度、软化点和延度试验结果见图1。

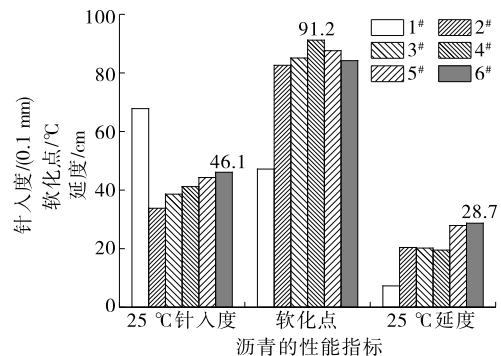


图1 不同沥青的针入度、软化点和延度

由图1可知:1)与基质沥青相比,高黏度弹性恢复沥青的物理性能明显改善。高黏度弹性恢复沥青的针入度明显降低,这是由于SBS、CR和RA的加入使基质沥青硬化,稠度有所增加;随着CR的增加、RA的减少,高黏度弹性恢复沥青的针入度略有增加。2)与基质沥青相比,高黏度弹性恢复沥青的软化点增大,RA掺量为10%、CR掺量为15%时,高黏度弹性恢复沥青的软化点为91.2℃,比基质沥青提高92.8%;随着CR的增加,高黏度弹性恢复沥青的软化点增大,随着RA掺量的减少,高黏度弹性恢复沥青的软化点降低。软化点的提升使高黏度弹性恢复沥青的温度敏感性得到显著改善。3)延度是反映沥青塑性的指标。与基质沥青相比,高黏度

弹性恢复沥青的延度有所增加,其塑性优于基质沥青;CR 掺量增加,高黏度弹性恢复沥青的延度变化不明显,而 RA 掺量降低,高黏度弹性恢复沥青的延度明显增加,塑性有所增强;RA 掺量为 6%时,高黏度弹性恢复沥青的延度为 28.7 mm,与基质沥青相比增加 293.2%。

2.1.2 动力黏度

黏度较大的沥青在荷载作用下产生的剪切变形较小,弹性恢复性能较好,残留的永久变形较小,沥青混合料具有更好的高温性能^[10]。6 种沥青的动力黏度测试结果见图 2。

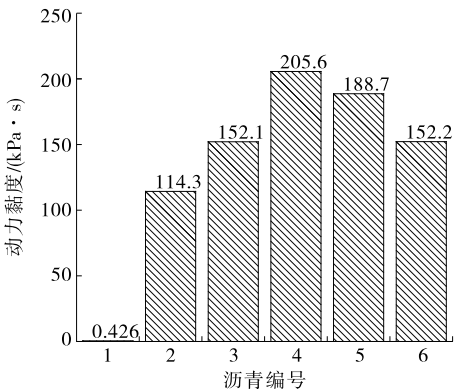


图 2 不同沥青的动力黏度(60 °C)

从图 2 可以看出:与基质沥青(其动力黏度为 0.426 kPa·s)相比,高黏度弹性恢复沥青的动力黏度显著增加,高温性能得到显著改善。随着 CR 掺量的增加,高黏度弹性恢复沥青的动力黏度逐渐增加,沥青的胶结能力增强。60 °C 时,SBS 掺量为 3%、CR 掺量为 15%、RA 掺量为 10%时,高黏度弹性恢复沥青的动力黏度最大,为 205.6 kPa·s。动力黏度增加主要是由于 CR 与 SBS 在高温下发生一系列化学反应,稳定剂的加入也使改性剂的交联程度增强,使生成的聚合物网状结构密集程度增强。较高的黏度把集料包裹更紧密,沥青的路用性能增强^[11]。

2.1.3 弹性恢复性能

弹性恢复试验主要用于评价热塑性橡胶类聚合物改性沥青拉伸后的恢复性能,即使用数码延度仪拉伸到一定程度后可恢复变形的百分率。6 种沥青的弹性恢复试验结果见表 4。

由表 4 可知:与基质沥青相比,高黏度弹性恢复沥青的弹性恢复率增大,2#~6# 高黏度弹性恢复沥青的弹性恢复率的增幅分别为 16.1%、20.1%、22.6%、21.7%、21.1%,CR 对高黏度弹性恢复沥青

表 4 不同沥青的弹性恢复试验结果

沥青编号	残留长度/cm	弹性恢复率/%	沥青编号	残留长度/cm	弹性恢复率/%
1	1.94	80.6	4	0.12	98.8
2	0.64	93.6	5	0.19	98.1
3	0.32	96.8	6	0.24	97.6

弹性恢复性能的影响比 RA 更明显。改性剂的加入使基质沥青的胶质和沥青质含量增大,增强了沥青的抗塑性变形能力,沥青的高温变形恢复性能增强。

2.1.4 黏韧性

6 种沥青的黏韧性试验结果见图 3。

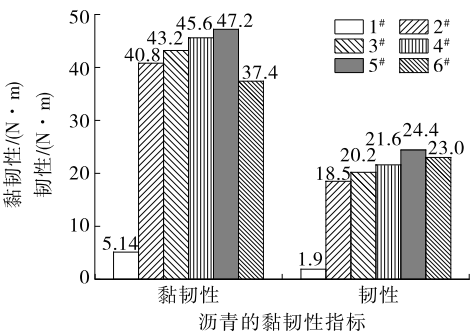


图 3 不同沥青的黏韧性试验结果(25 °C)

由图 3 可知:随着 CR 掺量的增加,高黏度弹性恢复沥青的黏韧性和韧性均增强;随着 RA 掺量的增加,高黏度弹性恢复沥青的黏韧性和韧性先增加后减小。原因可能是 RA 掺量增加对 SBS 形成的网状结构有所破坏,使橡胶分子与 SBS 不能形成有效的交联结构,导致沥青的黏韧性和韧性降低。SBS 掺量为 3%、CR 掺量为 15%、RA 掺量为 8%时,高黏度弹性恢复沥青的黏韧性、韧性均最大,分别为 47.2 N·m、24.4 N·m。沥青的黏韧性和韧性不仅反映沥青的黏结能力,还一定程度上体现沥青的塑性,较好的黏韧性可改善沥青的拉伸能力和弹性,使沥青具有更好的抗冲击能力。

2.2 流变性能

2.2.1 DSR 试验

DSR 试验可揭示沥青的流变特性,评价沥青的高温性能。采用车辙因子反映沥青抗剪切变形的能力,车辙因子越大,沥青的抗变形能力越好。DSR 试验结果见图 4。

由图 4 可知:随着温度的升高,沥青的车辙因子逐渐降低。与 1# 基质沥青相比,2#~6# 高黏度弹性恢复沥青的车辙因子大幅提升,SBS 掺量为 3%、CR 掺量为 15%、RA 掺量为 10%时达到最大值。

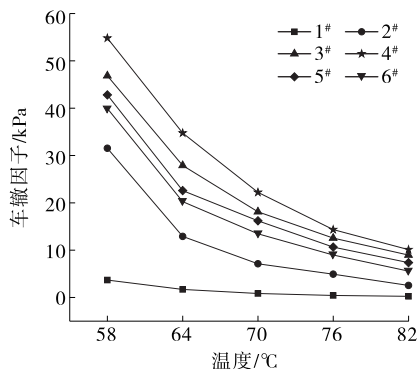


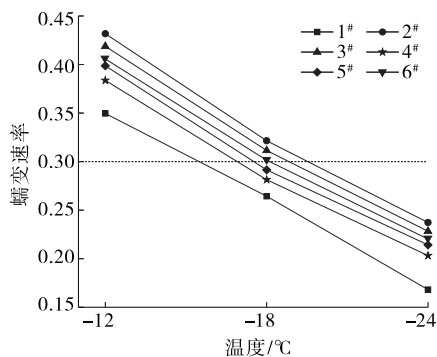
图4 不同沥青的车辙因子

64 ℃时, 2[#]、3[#]、4[#] 沥青的车辙因子分别为 12.85 kPa、27.80 kPa、34.64 kPa, 4[#] 沥青的车辙因子分别为 2[#]、3[#] 沥青的 2.70 倍、1.25 倍; 4[#]、5[#]、6[#] 沥青的车辙因子分别为 34.64 kPa、22.5 kPa、20.17 kPa, 4[#] 沥青的车辙因子分别为 5[#]、6[#] 沥青的 1.54 倍、1.72 倍。随着 CR、RA 掺量的增加, 高黏度弹性恢复沥青的车辙因子明显提升, 这主要是由于 SBS、RA 和 CR 使沥青的胶体结构发生改变, 沥青质增加、胶质减少, 它们共同作用产生的聚合物网状结构增强^[12-13]。车辙因子反映沥青抵抗剪切荷载的能力, 高黏度弹性恢复沥青在更宽的温度范围内具有较好的抗车辙能力, 其高温破坏温度显著提高。

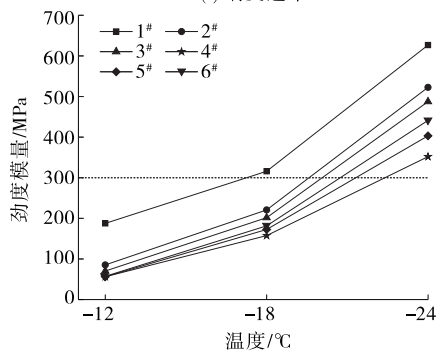
2.2.2 BBR 试验

劲度模量和蠕变速率表征沥青的低温抗裂性能, 劲度模量越小, 越能适应温度梯度产生的温度应力; 蠕变速率越大, 沥青的松弛性能越好, 不易产生开裂。6 种沥青的 BBR 试验结果见图 5。

根据 SHRP 规范, 劲度模量小于 300 MPa、蠕变速率大于 0.3 时, 沥青具有较好的低温抗裂性能。由图 5 可知: 温度相同时, 随着 CR 和 RA 掺量的增加, 高黏度弹性恢复沥青的蠕变速率降低, 劲度模量先降低后增加, 表明掺加 CR 和 RA 会对高黏度弹性恢复沥青的低温抗裂性能产生不利影响。但与 1[#] 基质沥青相比, 5 种高黏度弹性恢复沥青的低温流变性能均明显增强。试验温度为 -12 ℃时, 6 种沥青的蠕变速率和劲度模量均满足规范要求; -18 ℃时, 仅 2[#]、3[#]、6[#] 高黏度弹性恢复沥青满足规范要求; -24 ℃时, 6 种沥青的低温性能均不满足规范要求。综上, -12 ℃时高黏度弹性恢复沥青满足低温流变性能要求, 但当高黏度弹性恢复沥青应用于极寒地区时, 建议 SBS 掺量取 3%、CR 掺量小于 12.5%、RA 掺量小于 6%。



(a) 蠕变速率



(b) 劲度模量

图5 沥青的低温流变性能

3 结论

采用橡胶粉和布敦岩沥青替代部分 SBS 改性剂制备 5 种不同改性剂掺量的高黏度弹性恢复沥青, 通过常规性能和流变性能试验, 得到以下结论:

(1) 综合分析高黏度弹性恢复沥青的黏度、弹性恢复能力和高低温性能, 高黏度弹性恢复沥青的最佳配比为 SBS 掺量 3%、RA 掺量 10%、CR 掺量 15%、稳定剂掺量 0.2%。

(2) RA 和 CR 可显著提升高黏度弹性恢复沥青的软化点、黏度、弹性恢复性能和黏韧性, 提高其高温性能, 增强其抗冲击能力和抗塑性变形能力。

(3) 随着 CR、RA 掺量的增加, 高黏度弹性恢复沥青的车辙因子明显提升, 抵抗剪切荷载的能力增强, 在更宽的温度范围内具有较好的抗车辙能力, 沥青的高温破坏温度显著提高。与基质沥青相比, 高黏度弹性恢复沥青的低温流变性能明显增强, -12 ℃时, 其低温性能满足低温流变性能要求。

参考文献:

- [1] 姚鸿儒, 吴钊, 常大伟, 等. 高黏度改性沥青黏韧性的影响因素[J]. 石油沥青, 2021, 35(1): 51-56+66.

(下转第 72 页)

有限公司,2019.

- [3] 交通运输部公路科学研究院.公路沥青路面养护设计规范:JTG 5421—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [4] 孙立军,刘喜平.路面使用性能的标准衰变方程[J].同济大学学报(自然科学版),1995,23(5):512—518.
- [5] 交通部公路规划设计院.公路自然区划标准:JTJ 003—1986[S].北京:中国标准出版社,1986.
- [6] 荣建国,王浩仰.路网级沥青路面使用性能衰变模型的标定[J].交通科学与工程,2019,35(4):22—27.
- [7] 中华人民共和国交通运输部办公厅.关于调整公路交通情况调查车型分类及折算系数的通知:厅规划字[2010]205号[A].北京:中华人民共和国交通运输部办公厅,2010.

- [8] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准:JTG H20—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [9] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准:JTG 5210—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [10] 甘梁刚,毛立举,林茂森.江西省公路养护科学决策管理系统的构建及应用[C]//中国公路养护与管理分会.2014全国公路养护技术学术年会论文集(路面卷).北京:人民交通出版社股份有限公司,2014:138—141.

收稿日期:2022—03—31

(上接第48页)

(3) 综合考虑沥青混合料的性能,采用累积损伤理论设计,得到4 cm SBS改性沥青 SMA—13+10 cm 高模量沥青混合料 EME14+10 cm 高模量沥青混合料 EME14+20 cm 70# 道路石油沥青 ATB—25+20 cm 级配碎石的沥青路面结构,该结构的永久变形主要集中于上部,符合长寿命沥青路面的理念。

参考文献:

- [1] 吕正龙.长寿命半刚性基层沥青路面的设计分析[J].建材装饰,2020(20):43—45.

- [2] 杨永顺,韦金城,高雪池,等.永久性沥青路面设计方法研究[R].济南:山东省交通厅公路局,2008.
- [3] NEWCOMB D E, WILLIS R, TIMM D H. Perpetual asphalt pavements: A synthesis [R]. The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2010.
- [4] 沈金安.国外沥青路面设计方法总汇[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [5] 王伟力,唐中华,孔令云,等.隧道半刚性基层沥青路面沥青层疲劳开裂分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(2):39—45.

收稿日期:2022—04—06

(上接第52页)

- [2] 张金生,马丽莉,陈奕辛.高粘沥青与沥青混合料性能对比研究[J].四川水泥,2020(2):313—314.
- [3] 朱振祥,田隽,王冻,等.高粘弹改性沥青 SMA—5 超薄磨耗层路用性能研究[J].山东交通科技,2019(5):71—73.
- [4] 张海涛,李尚涛.增塑 SBS 沥青与基质沥青老化耐久性的对比研究[J].公路工程,2019,44(6):213—216+239.
- [5] 王卫雷,马柱,李大为,等.胶粉掺量对橡胶改性沥青低温性能的影响[J].城市道桥与防洪,2021(6):278—281.
- [6] 豆怀兵,陈拴发,祝斯月,等.高粘改性沥青胶浆粘弹特性研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(4):53—57.
- [7] 黄卫东,高杰,郝庚任,等.高粘 SBS 改性沥青的流变性能与化学特性研究[J].建筑材料学报,2021,24(5):1024—1031+1038.

- [8] 熊梦日,王辉.预处理废胶粉复合改性沥青制备工艺探讨[J].公路与汽运,2022(1):51—53.
- [9] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [10] 王律明.掺加不同纤维高粘弹沥青力学性能影响分析[J].山西建筑,2015,41(17):82—83.
- [11] 时敬涛,袁野,张生泉,等.高粘助剂对高粘高弹沥青性能的影响规律研究[J].石油沥青,2019,33(5):7—11.
- [12] 靳可.SBS/废胶粉复合高粘度改性沥青的制备及性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2020.
- [13] 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.

收稿日期:2022—03—22