

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.04.052

高掺量橡胶改性沥青性能研究及优选

邱文利¹,徐飞翔²,冯雷¹,郝文世¹,张莹¹,陈先华²

(1.河北雄安京德高速公路有限公司,河北保定071000;2.东南大学交通学院,江苏南京210096)

摘要:橡胶沥青的掺量大小对沥青的性能和使用成本都有显著的影响。为了提高橡胶改性沥青掺量的同时兼顾其性能,本研究选择20%、30%、40%、50%4种掺量的橡胶改性沥青,通过温度扫描试验和弯曲梁流变试验评价不同掺量的橡胶改性沥青的高温性能与低温性能,并根据规范要求确定PG分级。通过拟合半对数坐标下车辙因子-温度曲线,对比了老化前后各个沥青的感温性。结果表明:高温流变性能方面,老化前后车辙因子大小均表现为40%RA>30%RA>50%RA>20%RA,当胶粉掺量超过40%以后,高温性能显著下降。随着胶粉掺量的提高,胶粉改性沥青的高温性能先上升后下降,考虑高温性能,则胶粉掺量不宜超过40%。从半对数坐标的拟合结果来看,掺量在20%~40%之间时,胶粉能提高沥青的温度稳定性。低温性能方面,随着胶粉掺量的提高,胶粉改性沥青的低温变形能力和应力松弛能力逐渐增强。综合温度扫描试验和BBR试验的结果,得到4种胶粉改性沥青的PG分级结果:20%RA为PG82-22,30%RA/40%RA为PG88-28,50%RA为PG82-34。综合考虑性能和经济性,在实际工程中较为推荐30%掺量和40%掺量的胶粉改性沥青。

关键词:道路工程;橡胶掺量;高低温性能;PG分级;SHRP试验

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2023)04-0194-05

0 引言

随着国内路网的建设扩张和人均汽车出行里程的不断增大,交通行业的绿色和经济化发展成了道路领域研究的重点。有结果统计^[1-2],每年全世界废弃的轮胎数量达到15亿条,其中,中国产生的废弃轮胎数量所占的比例约为20%。大量废旧轮胎的弃置与焚烧,不仅造成了严重的资源浪费,也对我国的气候和环境造成了威胁。

在废旧轮胎的再利用方面,许多学科领域的学者都做出了探索,其中一个较为成功的实践就是将废旧轮胎加工得到的橡胶粉作为沥青的改性剂,通过一定的制备工艺得到橡胶改性沥青,体现了绿色环保的理念。相比于普通沥青路面,废旧橡胶改性沥青的路用性能也有大幅提高,并且制作成本远低于SBS改性沥青,也展现了其优秀的经济性,被越来越多的工程所青睐。但过高的胶粉掺量容易导致沥青黏性过大,加大施工的难度^[3-6],并且影响沥青的性能和储存稳定性。因此,目前常用的橡胶沥青的胶粉掺量往往不超过20%,但许多研究表明,现有的技术已经可以将沥青中胶粉的掺量提高至30%以上。

杨三强^[7]通过对掺量为30%的高掺量橡胶沥青进行微观试验分析,发现添加活化剂是对高掺量橡胶沥青进行增容的有效方法,活性聚合剂中的C链和苯环是提高胶粉与沥青相容性的主要原因。王新强^[8]分别对30%和40%胶粉掺量的沥青进行沥青混合料动态黏弹性分析,结果表明两种胶粉掺量下沥青混合料的动态模量和相位角出现了明显的差异,橡胶粉对沥青混合料的黏弹性有直接影响。周晓雨^[9]将30%高掺量橡胶沥青与20%掺量橡胶沥青的性能指标进行了对比,发现高掺量橡胶沥青高温性有大幅度提高,但低温性能有所下降。为了验证高掺量橡胶沥青的低温施工的可行性,Sol Sánchez Miguel等^[10]向沥青中添加了一定量的温拌剂,并测试了其各项指标,发现添加温拌剂后拌合温度下降了45℃,但其各项力学指标并不会受到明显影响。

橡胶沥青中胶粉掺量的改变会显著影响沥青的高低温性能,但研究往往只局限于20%左右,对于更高胶粉掺量对沥青性能的影响,需要进一步的研究^[11-14]。因此,本研究采用SHRP提出的沥青评价体系,采用动态剪切流变试验(DSR)和弯曲梁流变试验(BBR)对不同掺量的橡胶沥青进行对比研究,评价高胶粉掺量对沥青性能的影响,从而进一步提升橡胶沥青的掺量^[13],不仅节约了工程建设成本,更顺应了我国资源节约、环境友好型发展战略。

收稿日期:2022-06-15

基金项目:河北省交通运输厅科技项目(JD202004)

作者简介:邱文利(1970—),男,本科,高级工程师,从事道路工程相关工作。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

根据方法^[15]制备 20%、30%、40%和 50%掺量(内掺)的橡胶改性沥青,相关指标见表 1。橡胶粉采用 40 目粒径的天然橡胶,活化方式为化学增容,添加活性聚合剂和古马隆树脂改性剂,与橡胶内的不饱和键结合,从而提升沥青中胶粉的掺量。

表 1 高掺量橡胶沥青基本指标

试验项目	20%RA	30%RA	40%RA	50%RA
25℃针入度 /0.1 mm	63	56	47	42
5℃延度 /cm	18	19	19	22
软化点 /℃	79	81.5	81	83
180℃黏度 /($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	3.7	3.4	3.1	2.8
TFOT				
质量损失 /%	-0.21	-0.15	-0.3	-0.25
后残				
25℃针入度 /%	79	76	78	73
留物				
5℃延度 /cm	8	10	11	11

1.2 试验方案

1.2.1 高温性能试验

本研究对选取的 4 种沥青进行采用动态剪切流变法对比其高温性能,所用的动态剪切流变仪如图 1 所示。通过施加正弦规律变化的应力或应变,得到材料的黏弹性数据。试验选择控制应变模式,加载应变为 10%,频率为 10 rad/s,选择 70℃、76℃、82℃、88℃进行试验。由于选用的沥青为高掺量橡胶沥青,胶粉经过溶胀作用,其颗粒大小可能会超过 Superpave 规范规定的 250 μm 。因此,如果采用常规的 1 mm 试样厚度,大颗粒胶粉可能会对实验结果产生一定的影响。考虑到胶粉的大小对试验数据的潜在影响,陈呈^[16]制作了 1 mm 和 2 mm 厚度的试样进行动态剪切流变试验,对比的结果表明,2 mm 的试样厚度对复数模量的影响不大,依然能反映试样的黏弹特性。因此,本研究采用 2 mm 的试样厚度进行试验。



图 1 动态剪切流变仪

1.2.2 低温性能试验

沥青作为一种黏弹性材料,在常温时具有较好的应力松弛能力,但是在低温状态下会显著变硬,从柔性材料向刚性材料转化,在局部集中荷载作用下易发生脆性断裂。因此,本研究借助采用弯曲梁蠕变仪测试 4 种沥青的低温断裂特性。试验仪器如图 2 所示。试验样品经过 5 h 薄膜烘箱老化和 20 h 压力老化,加热至流动状态后浇筑到标准模具中,低温冷却后脱模,成型的试件尺寸为 12.7 mm \times 6.35 mm \times 12.7 mm。控制试验接触荷载为 35 mN \pm 10 mN,初始试验荷载为 980 mN \pm 50 mN。试验温度为 -24℃、-18℃、-12℃,记录 60S 时的弯曲蠕变劲度模量 S 和劲度变化率 m 。



图 2 弯曲梁流变仪

2 试验结果分析

2.1 高温性能试验

通过 DSR 试验得到的复数模量和相位角结果如图 3 和图 4 所示。

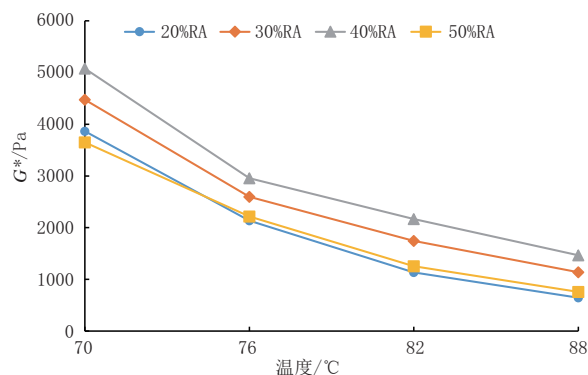


图 3 复数模量结果

由图 3 可知,在试验的温度范围以内,材料的复数模量 G^* 均随着温度的升高而降低,随着橡胶掺量的增大先升高后下降。当掺量为 40%时,复数模量最大。复数模量表征沥青受到剪切作用时产生的阻力,复数模量越大,材料的抗变形能力越强。因此,从复数模量的大小关系可知,当胶粉掺量不超过 40%时,胶粉能够加强沥青材料的抗变形能力。

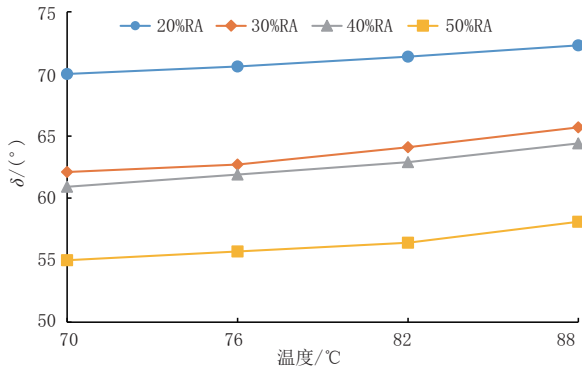


图4 相位角结果

相位角表征材料黏性与弹性成分之间的比例,相位角越小,弹性成分相对更多,沥青表现出来的弹性特征越明显。由图4可知,4种沥青的相位角随温度升高而增大,但是增长的幅度不明显。随着橡胶掺量的增加,相位角逐渐减小,说明橡胶的加入改变了沥青内部黏弹性物质的比例,使沥青的弹性特征更明显,橡胶掺量越多,弹性特征越强。

车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 是沥青 PG 高温分级的主要指标,用来评价沥青的抵抗永久变形的能力。车辙因子越大,表示沥青高温状态下抵抗永久变形的能力越强,有更好的抗车辙性能。图5和图6是4种橡胶沥青在原样状态和短期老化之后的车辙因子-温度曲线。从中可以发现,车辙因子受温度的影响很大,车辙因子随温度的升高迅速减小,这说明高温会大大削弱沥青的抗变形能力。从老化前后4种沥青的车辙因子大小关系可以得到:40%RA > 30%RA > 50%RA > 20%RA,其中当温度为88℃时,老化前40%RA的车辙因子为20%RA的2.4倍。表明胶粉能显著改变沥青的高温稳定性,并且当胶粉掺量为40%时,橡胶沥青抵抗永久变形的能力最强,并且老化前后,橡胶沥青的性能不会发生突变。

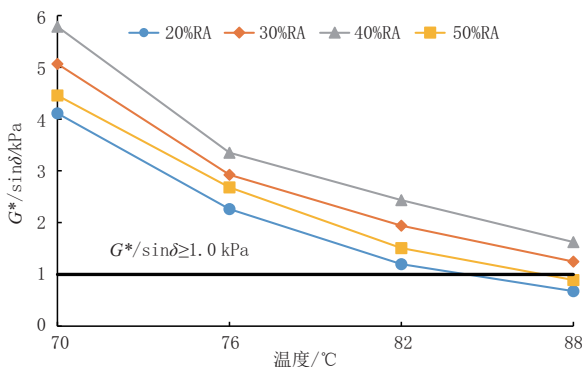


图5 原样沥青车辙因子-温度曲线

根据 ASTM-D6373-16 对 PG 分级的规定,原样沥青车辙因子不小于 1.0 kPa,短期老化后沥青车辙因子不小于 2.2 kPa,确定4种橡胶沥青的高温分级

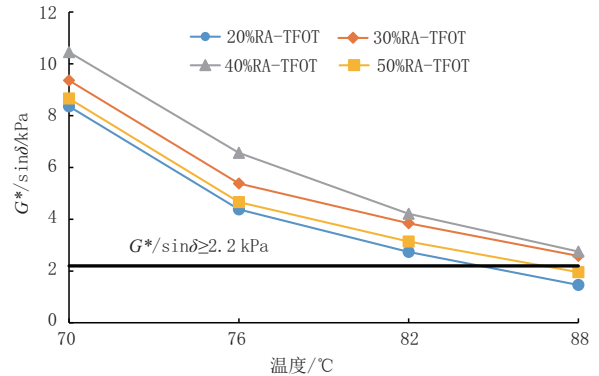


图6 短期老化沥青车辙因子-温度曲线

分别为:20%RA/50%RA 为 PG82,30%RA/40%RA 为 PG88。

研究发现^[17],动态剪切试验得到的车辙因子与温度在双对数坐标下有一定的相关性:

$$\lg \lg G = GTS \cdot \lg T + C \quad (1)$$

式中: G 为车辙因子; T 为开式温度,单位为K; GTS 为车辙因子指数(线性关系式的斜率)。

GTS 的大小表征沥青在高温时的温度敏感性的相对大小,可以作为几种橡胶沥青温度敏感性的评价指标。分别绘制几种沥青在原样和老化后的半对数车辙因子-温度曲线,如图7和图8所示。原样沥青和老化后沥青的双对数公式拟合结果见表2和表3。

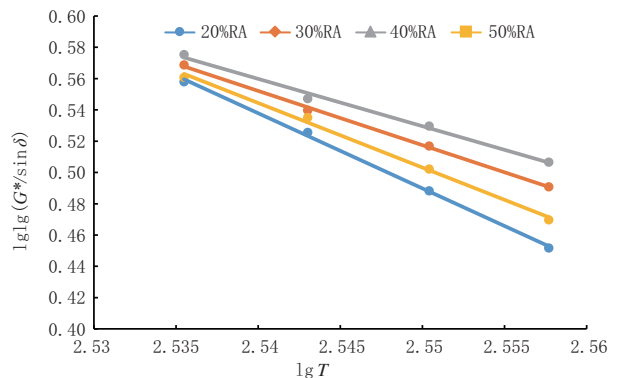


图7 原样沥青双对数坐标车辙因子-温度曲线

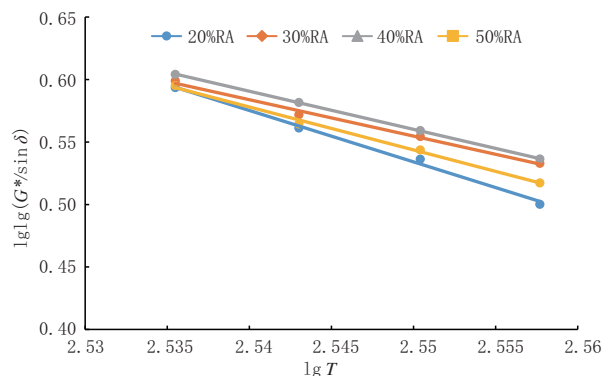


图8 老化沥青双对数坐标车辙因子-温度曲线

各种沥青车辙因子拟合曲线的 R^2 均大于 0.99,证明了在双对数坐标下车辙因子和温度有较强的线

表2 原样沥青双对数曲线拟合结果

沥青种类	曲线方程	GTS	R ²
20%RA	$y = -4.809 8x + 12.755$	4.809 8	0.998 6
30%RA	$y = -3.468 9x + 9.3631$	3.468 9	0.998 4
40%RA	$y = -3.027 6x + 8.2499$	3.027 6	0.992 7
50%RA	$y = -4.130 4x + 11.036$	4.130 4	0.996 1

表3 老化沥青双对数曲线拟合结果

沥青种类	曲线方程	GTS	R ²
20%RA	$y = -4.116 4x + 11.031$	4.116 4	0.995 2
30%RA	$y = -2.910 2x + 7.975 8$	2.910 2	0.993 3
40%RA	$y = -3.047 8x + 8.332$	3.047	0.999 9
50%RA	$y = -3.439 5x + 9.314 5$	3.439 5	0.995 4

性相关性。其中,GTS为拟合公式的斜率,其相对大小可以用来评价沥青的感温性,GTS越小,说明沥青的温度敏感性越低。

由表中数据可知,原样沥青的温度稳定性依次为40%RA>30%RA>50%RA>20%RA,老化后4种沥青的温度稳定性依次为30%RA>40%RA>50%RA>20%RA,说明胶粉的加入能增强沥青的温度稳定性,但当掺量超过40%之后,过量的胶粉反而会影响整体的温度稳定性,可能原因是胶粉过多导致胶粉物理溶胀效果不佳。因此,从沥青高温稳定性的角度来看,胶粉的最佳掺量为40%。

2.2 低温性能试验

弯曲蠕变劲度模量S表征沥青在低温时的变形能力。在同一温度下,弯曲蠕变劲度模量S越小,表示沥青的变形能力越强,越不容易发生脆性开裂。蠕变速率m表征沥青低温时受到竖向荷载时的应力松弛能力和对加载试件的敏感性,蠕变速率m越大,应力松弛能力越强,抗低温开裂的能力越强。

BBR试验得到的弯曲蠕变劲度模量S和蠕变速率m如图9和图10所示。

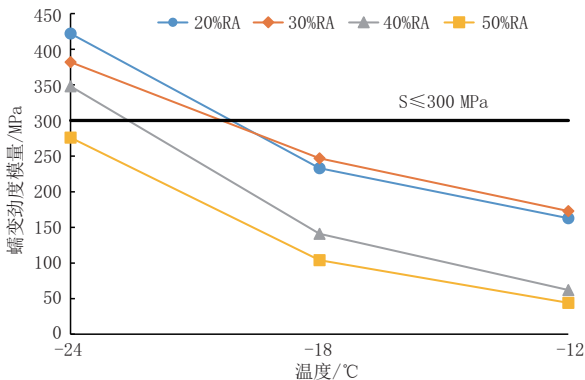


图9 弯曲蠕变劲度模量

由图9和图10可得到以下结论:

(1)4种沥青的弯曲蠕变劲度模量S均随着温度

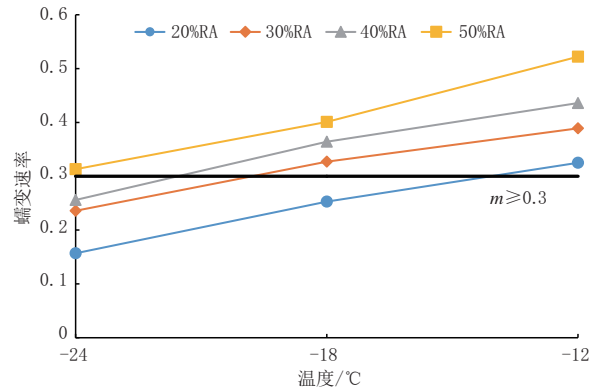


图10 蠕变速率

的升高而降低,其中40%RA和50%RA的弯曲蠕变劲度模量显著小于20%RA和30%RA,表明40%RA和50%RA的低温变形能力更强。20%RA和30%RA的蠕变劲度模量S以-18°C为分界点,当温度低于-18°C时,20%RA大于30%RA。

(2)4种沥青的蠕变速率m随着温度的升高而增大。4种沥青的蠕变速率m大小关系为:50%RA>40%RA>30%RA>20%RA,说明胶粉的加入提高了沥青的应力松弛能力。

(3)根据ASTM-D6373-16对BBR试验结果的要求:弯曲蠕变劲度模量 $S \leq 300$ MPa,蠕变速率 $m \geq 0.3$,确定4种沥青的低温分级:50%RA为PG-34,30%RA/40%RA为PG-28,20%RA为PG-22。

3 结论

本研究对通过DSR试验和BBR试验得到的数据进行分析,对比了不同橡胶掺量时沥青的高低温特性,得到以下结论。

(1)橡胶的加入可以提高沥青的复数模量,同时减小相位角,提高沥青的弹性,从而增强了沥青的抗变形能力。当掺量为40%时,抵抗永久变形的能力达到最强。

(2)通过拟合双对数坐标系下的车辙因子-温度曲线,验证了在双对数坐标下车辙因子与温度有良好的线性关系,从而对比了不同掺量沥青的感温性能,发现胶粉能改变沥青的感温性能,其中40%掺量的沥青感温性能最稳定。

(3)通过弯曲蠕变试验的结果,说明橡胶的加入可以显著提高沥青的低温性能,掺量越高,提升的效果越大。

(4)综合DSR试验和BBR试验的结果,确定了4种沥青的PG分级:20%RA为PG82-22,30%RA/40%RA为PG88-28,50%RA为PG82-34。

(5)从兼顾高低温性能的角度,掺量在30%~40%之间的高掺量橡胶沥青性能较优。

参考文献:

[1] 李壮壮.天然橡胶改性沥青性能的试验研究[D].大连:大连理工大学,2020.

[2] 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.

[3] 吴春颖,李爱芳,于明明,等.新型反应型活性橡胶沥青 SHRP 性能研究[J].石油沥青,2015,29(6):1-6.

[4] 杨三强,王国清,闰明涛,等.高掺量废旧胶粉改性沥青相容性改善实验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(6):48-54.

[5] 马万,邓宝智.不同胶粉掺量的橡胶沥青黏弹性性能评价[J].公路,2018,63(10):109-113.

[6] 徐鸥明,张壮,杨晨,等.胶粉掺量及存储时间对橡胶沥青技术性质的影响[J].中外公路,2015,35(5):273-275.

[7] 杨三强,王国清,闰明涛,等.高掺量废旧胶粉改性沥青相容性改善实验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(6):48-54.

[8] 王新强,王国清,王庆凯,等.高掺量胶粉改性沥青混合料动态粘弹性分析[J].硅酸盐通报,2018,37(10):3303-3309,3316.

[9] 周晓雨.高掺量废胶粉改性沥青指标与沥青混合料性能试验研究[D].保定:河北大学,2020.

[10] Sol-Sánchez M, del Barco Carrión A J, Hidalgo-Arroyo A, et al. Viability of producing sustainable asphalt mixtures with crumb rubber bitumen at reduced temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120154.

[11] 张广泰,方烁,叶奋.双螺杆挤出胶粉改性沥青流变性能研究[J].中国公路学报,2019,32(5):57-63,99.

[12] 何立平,魏建国,刘乐平.基于 Han 曲线的橡胶沥青结合料相态结构研究[J].公路交通科技,2017,34(5):10-18,94.

[13] 马万,邓宝智.不同胶粉掺量的橡胶沥青黏弹性性能评价[J].公路,2018,63(10):109-113.

[14] 张广泰,方烁,叶奋.双螺杆挤出胶粉改性沥青流变性能研究[J].中国公路学报,2019,32(5):57-63,99.

[15] 王国清.一种废旧橡胶粉改性沥青及其制备方法:中国,CN103881405B [P],2016-03-23.

[16] 陈呈.稳定型橡胶沥青的改性机理与性能研究[D].南京:东南大学,2017.

[17] 董楨.稳定型橡胶沥青与热再生技术复合应用研究[D].南京:东南大学,2018.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com