

多聚磷酸/脱硫胶粉复合改性沥青的制备及性能研究

袁剑波,殷婵,冯新军*,余帆

(长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为了提升脱硫橡胶沥青的综合性能,该文采用脱硫胶粉复合多聚磷酸改性的方式,基于响应曲面法优化复合改性沥青的制备参数,并制备普通橡胶、脱硫橡胶、多聚磷酸/普通橡胶复合和多聚磷酸/脱硫橡胶复合4种改性沥青,比较并分析它们各方面的性能。结果表明:相较于普通橡胶沥青,脱硫橡胶复合改性沥青的黏度更低,拌和、压实温度也有明显降低,体系中胶粉与沥青的相容更为稳定,便于橡胶沥青的制备、储存运输以及施工过程。而在路用性能方面,多聚磷酸/脱硫胶粉复合改性沥青的高温抗变形能力表现出与普通橡胶沥青相接近的水平,并且在低温环境下的蠕变能力更加优秀。在4种改性沥青中,多聚磷酸/脱硫胶粉复合改性沥青的性能优势明显,更适合推广应用。

关键词:脱硫胶粉;多聚磷酸;响应曲面法;黏温曲线;储存稳定性;流变性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

Preparation and Performance Study of Asphalt Modified by Polyphosphoric Acid/Desulfurized Crumb Rubber

YUAN Jianbo, YIN Chan, FENG Xinjun*, YU Fan

(School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: To improve the comprehensive performance of desulfurized rubber asphalt, the asphalt was modified by using desulfurized crumb rubber and polyphosphoric acid. Based on the response surface method, the preparation parameters of the composite modified asphalt were optimized. In addition, four types of modified asphalt were prepared by using ordinary rubber, desulfurized rubber, composite polyphosphoric acid/ordinary rubber, and composite polyphosphoric acid/desulfurized crumb rubber. Their performance was compared. The results show that compared with ordinary rubber asphalt, the asphalt modified by desulfurized rubber has lower viscosity, significantly lower mixing and compaction temperatures, and more stable compatibility between rubber powder and asphalt in the system, which facilitates the preparation, storage, transportation, and construction process of rubber asphalt. In terms of road performance, the high-temperature deformation resistance of asphalt modified by polyphosphoric acid/desulfurized crumb rubber shows a level similar to that of ordinary rubber asphalt, and its creep ability is more excellent in low-temperature environments. Among the four types of modified asphalt, the asphalt modified by polyphosphoric acid/desulfurized crumb rubber has more obvious performance advantages and is suitable for promotion and application.

Keywords: desulfurized crumb rubber; polyphosphoric acid; response surface method; viscosity-temperature curve; storage stability; rheological property

0 引言

随着全球车辆数量的增加,每年大约产生15亿个废轮胎^[1],目前还在急剧增加,给环境保护带来巨

大的压力。因此,如何处理这些废旧轮胎是许多国家亟待解决的问题,也是多年来的研究热点。研究表明:利用废旧橡胶粉末(Crumb Rubber, CR)对沥青结合料进行改性是解决这一问题的有效途径。将

收稿日期:2024-04-23

基金项目:湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(编号:202039)

作者简介:袁剑波,男,博士,教授.E-mail:yuanjb01@163.com

*通信作者:冯新军,男,博士,教授.E-mail:fxjasphalt@aliyun.com

CR添加到基质沥青中可以显著提高其路用性能,如高温稳定性、低温抗裂性和降噪性能^[2-4]。然而,橡胶改性沥青的缺点不容忽视。一方面,经过硫化工艺处理后,橡胶粉具有非常稳定的三维交联网状结构,其表面活性较低,橡胶粉在沥青中难以很好地相容,高温热储存过程中两相体系分离的风险大大增加^[5];另一方面,橡胶分子会在溶胀过程中吸收沥青中的轻质组分,施工拌和难度增大,路面难以压实^[6]。这种高黏特性以及低施工和易性带来了过多的能源消耗和施工成本^[7],且高温下产生的有害烟雾和刺激性气体,也会对工人和环境带来不利影响^[8]。上述缺点极大地限制了橡胶沥青的发展与工程应用。

近年来,脱硫胶粉(Desulfurized Crumb Rubber, DCR)因其环境友好性而逐渐被关注。较普通橡胶沥青而言,脱硫橡胶改性沥青不仅高温储存稳定性得到提高^[9],还拥有较低的黏度^[10]和良好的低温性能^[11],改善了橡胶沥青施工过程中的诸多问题,有利于橡胶沥青更广泛地应用。但脱硫工艺导致胶粉内部交联网络结构被打开,脱硫橡胶沥青的高温性能存在不足^[12-13],其沥青混合料难以满足高温抗变形的需求。因此,为了使脱硫橡胶沥青适应逐渐严酷的交通条件并扩大其应用范围,有必要采取措施提高其高温性能,复合改性方法就是一个不错的选择。

多聚磷酸(Polyphosphoric Acid, PPA)是一种高效低价且技术成熟的沥青改性材料,可显著提高沥青的高温性能^[14],同时有效提高其耐紫外光老化能力和热氧老化性能^[15-17],具有较高的性价比。此外,研究表明:PPA能提高聚合物类改性剂在沥青中的储存稳定性^[18]。鉴于此,本文采用多聚磷酸对脱硫橡胶沥青进行复合改性,制备脱硫胶粉/多聚磷酸复合改性沥青,探究改性沥青的最佳制备工艺参数,对比分析普通橡胶沥青、脱硫橡胶沥青及复合改性沥青间的性能差异,为制备综合性能良好的橡胶沥青提供理论依据。

1 原材料和方法

1.1 原材料

道路石油沥青来自中国石化(东海70#A级),普通废旧胶粉(60目)、脱硫胶粉均产自江苏中宏环保科技有限公司,110%型PPA由南京化学试剂股份有限公司购买。

1.2 改性沥青制备流程

参考相关学者的研究成果,胶粉掺量一般为

18%~30%^[12-13],多聚磷酸一般外掺0.5%~1.5%,即可对沥青产生显著的改性效果^[19-21]。采用湿法工艺,具体制备过程如图1所示。以添加改性剂的种类命名改性沥青样品:普通橡胶沥青(CR)、脱硫胶粉改性沥青(DCR)、普通橡胶复合多聚磷酸改性沥青(CR/PPA)以及脱硫胶粉复合多聚磷酸改性沥青(DCR/PPA)。需要说明的是,单一胶粉改性沥青只需要在加入胶粉后保持剪切1 h,而复合胶粉改性沥青则需要在剪切30 min后,再掺配一定量的PPA改性剂。

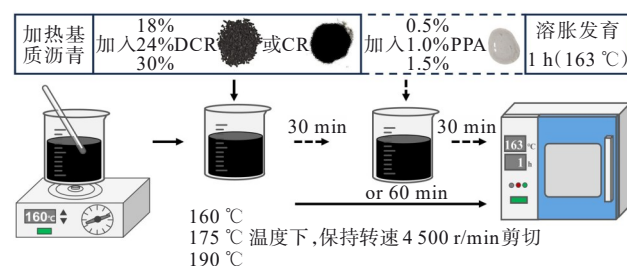


图1 改性沥青制备流程

Figure 1 Preparation process of modified asphalt

1.3 测试方法

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)^[22]中的T0604、T0605、T0606试验方法,分别对不同掺量的DCR/PPA复合改性沥青进行针入度、延度和软化点试验。采用布洛克菲尔德旋转黏度计对胶粉改性沥青的施工和易性进行表征。同时参照规程中T0661的聚合物改性沥青离析试验对胶粉改性沥青进行48 h离析试验,然后测试离析后样品上下部分的软化点差,并借用荧光显微镜观察分析改性剂的分布状况。其操作方法为:取适量熔融沥青样品置于载玻片上,盖上载玻片,加热样本至玻片表面平整,沥青呈半透明状,待样品冷却后置于显微镜下,利用TL-BF投射光模式进行观察,放大倍数为200倍。美国SHRP计划中,采用动态剪切流变仪(Dynamic Shear Rheometer,以下简称DSR)测试沥青,得到表征沥青黏弹性质的相位角 δ 和表征沥青抗变形能力的复数剪切模量 G^* ,并以车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 作为沥青在高温条件下的性能评价指标。相同温度下,车辙因子越大,代表沥青越有利于抵抗车辙变形。采用温度扫描模式,荷载施加频率为 (10 ± 0.1) r/s。SHRP计划中也采用低温弯曲梁流变仪(Beam Bending Rheometer,以下简称BBR)来评价沥青的低温性能,本文采用TE-BBR仪器对沥青小梁试件进行测试,试验温度为 -12°C 、 -18°C

和-24℃,以60 s时的劲度模量*S*和蠕变速率*m*表征沥青在低温状态下的蠕变变形性能与应力松弛,*S*值较小,*m*值较大,说明沥青具有更好的低温性能。

1.4 最佳制备工艺的确定

为确定DCR/PPA复合改性沥青的最佳制备工艺,利用响应曲面法(Response Surface Method,以下简称RSM),通过在设计变量和响应指标之间建立二阶多项式关系,从而确定设计变量的最佳组合和相应的最佳响应值。设计变量为*A*(DCR 掺量18%~30%)、*B*(PPA 掺量0.5%~1.5%)、*C*(剪切温度160~190℃),以针入度(25℃,100 g,5 s)、软化点、延度(5℃,50 mm/min)、软化点差、黏度(175℃)为响应指标,在BOX-Behnken Design模式下进行复合试验设计,并进行测试,结果如表1所示。

采用响应曲面软件对表1中的数据进行方差分析。以针入度为例,分析方差结果如表2所示,针入度响应曲面图、实测值与预测值关系如图2所示。该

模型的*P*值<0.000 1,相关系数*R*²为97.8%,说明该模型的拟合程度较高,误差较小,可以用该模型来预测和分析针入度的变化规律。其余4个响应值分析方法与针入度一致。

以改性沥青的高低温性能、储存稳定性以及施工和易性等综合性能最优为目标,确定响应值约束的目标,将其输入后得到响应输出和设计变量的最优值如表3所示。另外考虑到实际可操作性,最终选取的最佳制备工艺为:DCR 掺量21%、PPA 掺量1.1%、剪切温度180℃。在此基础上,实际测试DCR/PPA复合改性沥青的响应指标,发现与响应输出的最优值相接近,说明模拟结果可信,后续均采用此制备参数进行改性沥青的剪切。

2 结果与讨论

2.1 施工和易性

采用布氏黏度计测试了上述制备的4种改性沥

表1 DCR/PPA改性沥青各项性能试验结果
Table 1 Performance test results of DCR/PPA modified asphalt

编号	DCR 掺量/%	PPA 掺量/%	剪切温度/ ℃	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5℃延度/ mm	黏度/ (mPa·s)	软化点差/ ℃
1	24	1.0	175	49	63.2	98.1	651	1.2
2	24	1.5	190	48	63.2	79.4	712	0.7
3	24	1.5	160	47	64.3	76.6	740	1.6
4	18	0.5	175	55	60.4	91.6	395	0.5
5	24	1.0	175	50	63.1	96.5	675	1.3
6	30	0.5	175	49	64.8	93.3	887	3.1
7	24	0.5	160	52	62.9	106.5	601	1.9
8	24	1.0	175	49	65.1	96.3	695	1.4
9	18	1.5	175	48	67.2	74.4	669	0.3
10	30	1.0	190	48	66.6	83.8	966	1.6
11	24	1.0	175	49	64.9	97.2	697	1.3
12	30	1.5	175	47	71.0	75.9	1 365	2.2
13	24	0.5	190	53	60.1	108.6	557	0.9
14	24	1.0	175	50	63.8	95.3	665	1.2
15	30	1.0	160	48	67.1	82.6	1 710	3.6
16	18	1.0	190	53	61.9	76.3	406	0.2
17	18	1.0	160	52	62.6	71.8	570	1.2
规范值 ^[23]	—	—	—	40~80	≥58.0	≥80.0	—	≤2.5

表2 针入度方差分析结果
Table 2 Analysis of variance for penetration

项目	平方和	自由度	均方根	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性	项目	平方和	自由度	均方根	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性
模型	86.52	9	9.61	34.51	<0.000 1	显著	PPA 掺量	45.12	1	45.12	161.99	<0.000 1	显著
DCR 掺量	32.00	1	32.00	114.87	<0.000 1	显著	剪切温度	1.13	1	1.13	4.04	0.084 4	

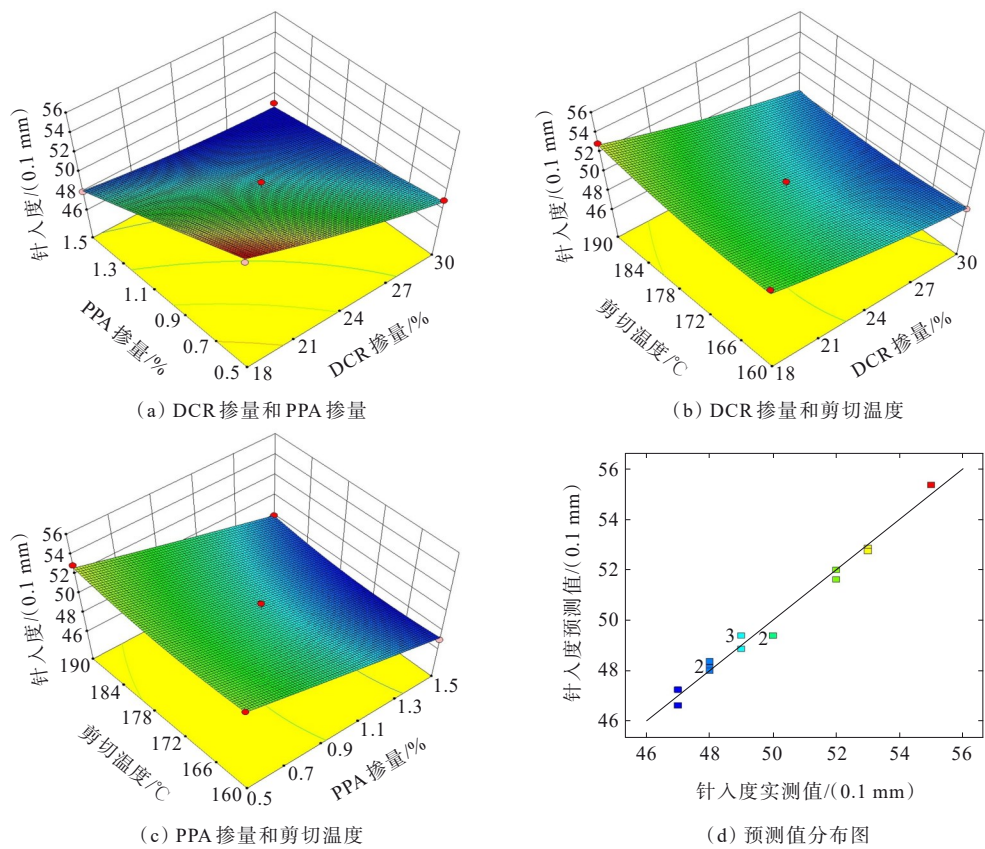


图2 针入度响应曲面及预测值分布图

Figure 2 Penetration response surface and distribution of predicted values

表3 DCR/PPA 改性沥青制备参数的设计优化

Table 3 Design optimization of preparation parameters for DCR/PPA modified asphalt								
项目	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度/ mm	软化点差/ ℃	黏度/ (mPa·s)	DCR 掺量/ %	PPA 掺量/ %	剪切温度/ ℃
响应值输入约束	50~70	Max	Max	Min	Min			
响应 最优值	50.12	63.63	90.19	0.72	588.9			
输出值 实测值	50.00	64.20	91.00	0.85	535.0			
设计变量最优值						21.12	1.10	178.49

注:Min代表该响应值的目标越小越好;Max代表该响应值的目标越大越好。

青样品在 135℃、145℃、155℃、165℃和 175℃的黏度,然后将所得结果与幂指数回归曲线进行拟合,采用对数坐标的形式,得到黏温曲线,如图 3 所示。

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)的规定,取黏度为(0.17±0.02) Pa·s 对应的温度作为沥青混合料的拌和温度,取黏度为(0.28±0.03) Pa·s 对应的温度为施工时压实温度,CR、CR/PPA、DCR、DCR/PPA 的压实和拌和温度范围可以分别计算,见图 4。

从图 3 可以看出:① 4 种改性沥青样品的黏度值都随着温度的升高而降低,这表明它们的流动性逐

渐增加,并接近牛顿液态。与 CR、DCR 相比,PPA 的加入会使复合改性沥青的旋转黏度进一步增加。根据 AASHTO M320 的规定,沥青在 135℃下的旋转黏度应不大于 3 Pa·s,以便于施工期间沥青混合料的泵送,此外,路面的压实性能也与沥青的施工和易性关联密切,其和易性越高则压实性能越好;② DCR、DCR/PPA 的 135℃黏度符合要求,而 CR、CR/PPA 在 135℃时黏度远大于 3 Pa·s,表明普通橡胶沥青黏度过大,很难与集料混合均匀,混合料难于压实,而脱硫胶粉改性沥青的施工和易性较好,更利于施工。

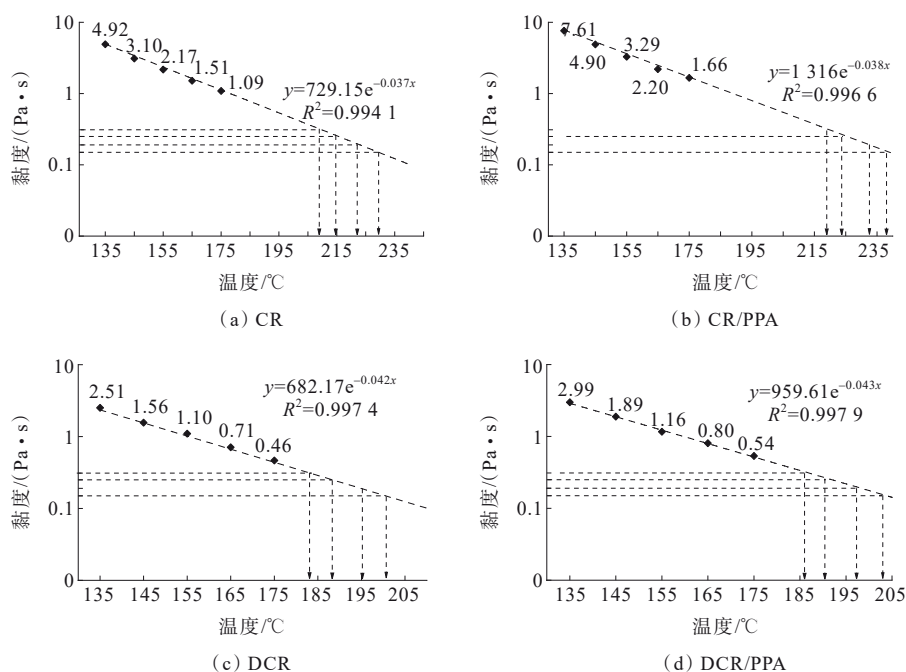


图3 单一/复合胶粉改性沥青黏温曲线

Figure 3 Viscosity-temperature curve of asphalt modified by single/composite crumb rubber

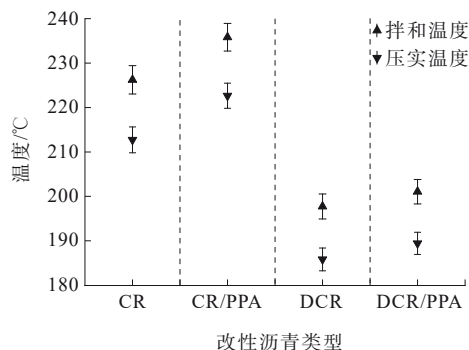


图4 单一/复合胶粉改性沥青压实/拌和温度

Figure 4 Compaction/mixing temperature of asphalt modified by single/composite crumb rubber

从图4可以看出:CR/PPA的拌和温度最高,压实温度也最大,CR稍次之。而经脱硫处理后,DCR的拌和、压实温度均大幅降低(约25℃),可有效降低沥青在生产施工时的能源消耗。此外,在DCR与PPA进一步复合后,沥青的拌和、压实温度只上升约3℃,对沥青的生产和施工过程影响不大,同时也保证了其对集料的黏结裹附效果。但是通过黏温曲线拟合后求解得到改性沥青的压实/拌和温度高于实际施工温度。

因此,横向对比说明脱硫胶粉改性沥青和脱硫胶粉复合改性沥青的拌和温度和压实温度均可以在普通橡胶沥青的基础上适当降低,后续需探究更科学合理的方法来确定改性沥青的压实/拌和温度。

2.2 储存稳定性

脱硫胶粉复合改性沥青由基质沥青相、膨胀胶粉相和改性剂相组成,不同相之间密度和溶解度参数的差异可能导致改性沥青在储存过程中出现离析现象,严重影响改性效果和应用^[24]。因此,有必要对制备的沥青样品的储存稳定性进行评估。参考ASTM D5976方法,使用改性沥青上下部之间的软化点差(℃)来定量评估储存稳定性。此外,通过荧光显微镜试验观察改性沥青顶部和底部的改性剂的分布及发育状况,以定性评估其储存稳定性。

2.2.1 离析后软化点差

经48 h热储存离析后,4种改性沥青的上下部软化点及其差值见图5。

从图5可以看出:

(1) DCR相比CR改性沥青的软化点小,而在加入PPA后,复合改性沥青的软化点都有所升高,特别是DCR/PPA样品的软化点提升到与CR样品相当的水平,说明复合改性弥补了DCR沥青由脱硫工艺带来的高温性能缺陷。

(2) CR、CR/PPA的48 h软化点差分别为5.9℃、3.8℃,不满足48 h软化点差小于2.5℃的规范要求,这说明橡胶改性沥青的储存稳定性较差,尚需进一步改善。4种橡胶沥青中,DCR/PPA的软化点差最小,在热存储48 h后软化点差仅为0.85℃,相比

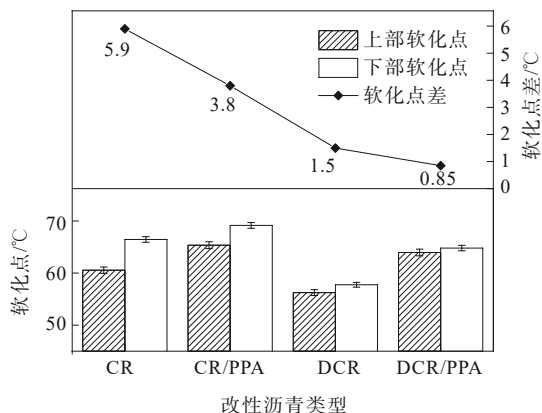


图5 胶粉单一/复合改性沥青离析上下部软化点及其差值

Figure 5 Softening points and their differences between upper and lower parts of asphalt modified by single/composite crumb rubber after segregation

于CR、CR/PPA、DCR,软化点差分别降低86%、78%、43%,说明其具有优良的储存稳定性。分析其原因如下:①橡胶改性沥青中橡胶与沥青仅发生物理溶胀反应,橡胶分子以团聚形态存在沥青中,而脱硫胶粉缺少凝胶颗粒核心^[25],且脱硫橡胶中的硫键交联点已经断裂,废胎胶粉从弹性状态变成塑性状态,恢复了很多生胶性能^[26];②高温条件下,沥青中的轻质组分更容易地进入到脱硫橡胶颗粒内部,使橡胶颗粒溶胀并最终降解,使其与基质沥青充分融合,残留胶粉颗粒数量较小,静态储存时脱硫胶粉迁移不明显,促使其上下部软化点数值较为接近。因此,DCR/PPA具有良好的热储存稳定性。此外,PPA是一种化学反应物,可以破坏沥青质的聚集体,使沥青质更好地分散在沥青中^[27]。同时,它也可以与沥青和脱硫胶粉发生化学反应,在高温高速剪切作用下,促进两者均匀分散并相互融合,使得它们相互重叠形成网络结构,进一步提升体系的储存稳定性^[28]。

2.2.2 离析后的荧光显微镜测试

离析后的荧光显微镜测试结果见图6。

从图6可以看出:热储存48h后,CR的上下段荧光物质差异最大,荧光物质在下部明显聚集。其原因如下:①胶粉的不完全溶解和重力作用导致的不均匀分布;②由于PPA对CR与沥青相容性的促进作用,CR/PPA中的荧光物质相对低于单独的CR。DCR的图像差异小于前两种改性沥青,这是因为胶粉脱硫后已解聚为小分子的胶粉颗粒,静态储存时脱硫胶粉迁移不明显。而DCR/PPA中荧光物质差异最小,只存在少量荧光物质,表明改性剂分散得更

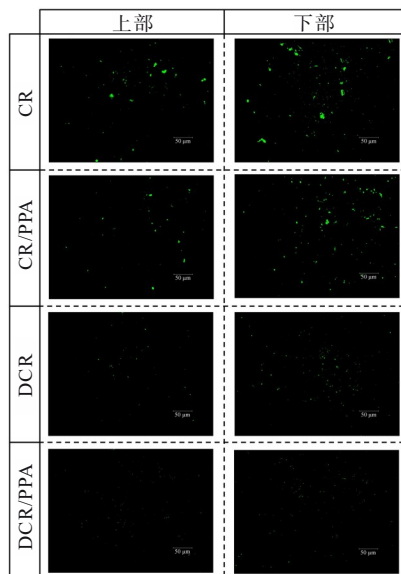


图6 胶粉单一/复合改性沥青离析上下部荧光图像

Figure 6 Fluorescence images of upper and lower parts of asphalt modified by single/composite crumb rubber after segregation

均匀,可归因于DCR与沥青良好的相容性,以及PPA对储存稳定性的改善作用。故在4种改性沥青中,DCR/PPA的储存稳定性最佳。

2.3 高温性能

采用DSR测试得到沥青的 G^* 、 δ 以及计算得到车辙因子 $G^*/\sin \delta$,结果如图7所示。由图7可知:整体来说,随着测试温度的升高,4个胶粉改性沥青样品的 G^* 均有所下降,最后趋于重合且相对平稳,而 δ 都随之增大, $G^*/\sin \delta$ 逐渐减小,表明沥青的抗变形能力是随着温度下降的。这是由于温度的升高使沥青逐渐向黏流状态转变,材料弹性占比减小,沥青由“硬”变“软”,相应的抗变形能力也降低^[29]。

沥青的PG高温等级划分时,要求原样沥青的 $G^*/\sin \delta$ 不小于1.0 kPa,得出对应的高温等级来分析沥青样品之间高温性能的差异。由图7可以看出:CR较DCR的高温等级提高了6℃左右,高温稳定性更优秀,分别加入PPA进行复合改性后,进一步提升胶粉改性沥青的车辙因子,特别是DCR/PPA样品,高温使用等级提高到与CR相接近的水平,这与前面软化点的结果是一致的。研究表明:胶粉在沥青中吸收其中的轻质组分后溶胀,相互黏结形成网络结构,溶胀胶粉之间形成阻尼作用,提高了沥青抗变形的能力^[30],而胶粉经过脱硫处理后,S—S、C—S键的断裂,导致胶粉分子量降低,溶胀形成的空间网格被破坏,因此,DCR的高温抗变形能力稍逊于CR。另

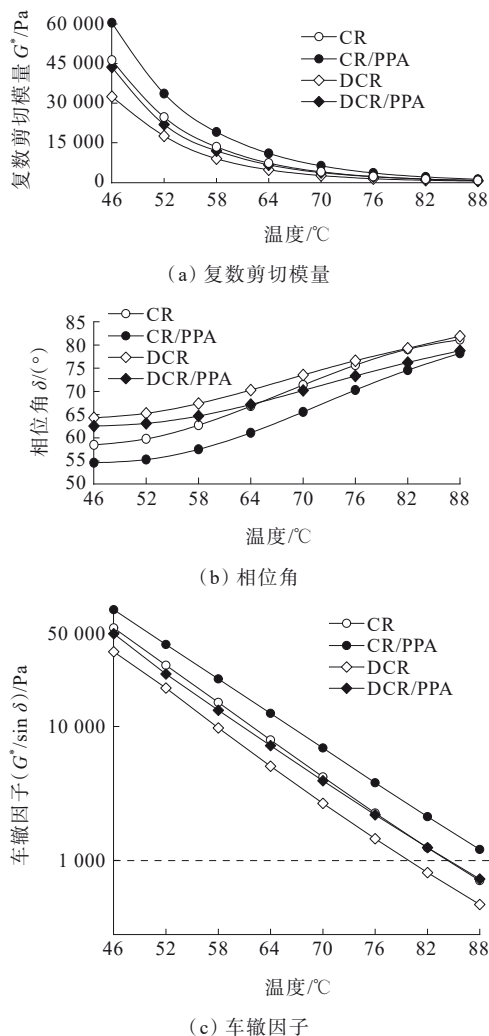


图7 胶粉单一/复合改性沥青DSR测试结果

Figure 7 DSR test results of asphalt modified by single/composite crumb rubber

外,PPA改性剂的掺入使沥青中的沥青质含量升高,促进沥青由溶胶结构转变为溶-凝胶结构,有助于其高温性能的提升^[31],弥补了DCR在高温环境下路用性能的缺陷。

2.4 低温性能

通过BBR试验评价改性沥青的低温性能,得到了蠕变劲度(S)和蠕变速率(m)参数。另外, S/m 指数与橡胶沥青的低温性能有很好的相关性,可以充分反映其低温变形能力和应力松弛能力, S/m 值越小,沥青结合料的低温性能越好^[32]。因此,在本研究中,计算了4种改性沥青样品的 S/m ,结果如图8所示。

由图8所知:随着测试温度的降低,所有沥青样品的 S 值增加,而 m 值则相反,这表明沥青的柔韧性和抗低温开裂能力随着温度的下降而降低。这是因为随着温度的下降,沥青会呈现出更多的弹性体特

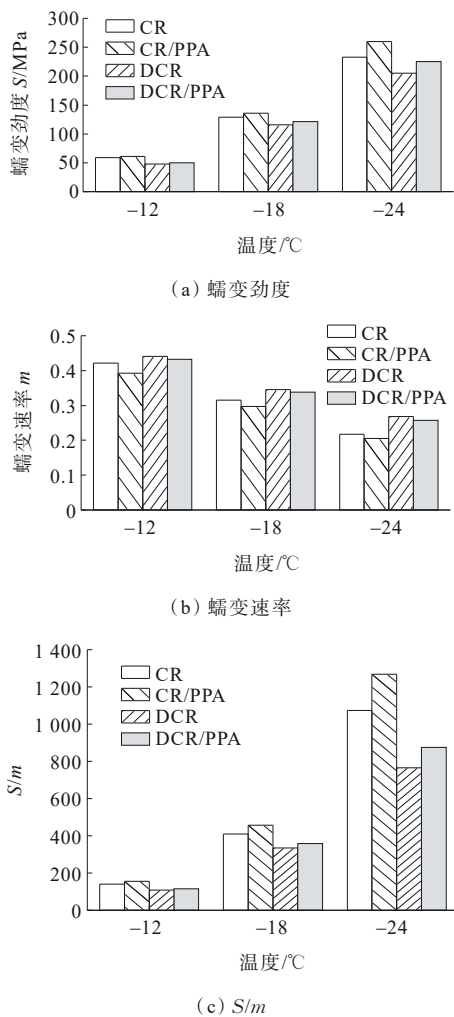


图8 胶粉单一/复合改性沥青BBR测试结果

Figure 8 BBR test results of asphalt modified by single/composite crumb rubber

性,变得更硬、更脆,从而降低其低温松弛能力。在相同的温度条件下,4种改性沥青样品的 S 顺序为: $DCR < DCR/PPA < CR < CR/PPA$, m 值的变化规律与 S 值相反,表明DCR在每个温度下都具有更好的柔韧性和应力松弛能力,DCR/PPA低温性能较之略有下降,但其低温性能仍远优于CR、CR/PPA。相比于普通橡胶粉,相同掺量的脱硫胶粉颗粒分子体积更小,数量更多。在低温下,产生的应力集中作用更少,沥青梁的受力更均匀,沥青的柔性也越大,其蠕变变形能力与应力松弛能力也越强。此外,PPA是一种聚合型酸性改性剂,加入后促进了沥青中的胶质向沥青质转化^[33],使得沥青中的分散相出现明显的缔合,影响了沥青的胶体结构。沥青宏观表现为更硬,但是在低温环境下,这样不利于释放施加于其上的应力,会对沥青的低温性能产生影响。综合

来说,使用脱硫处理的胶粉制备的改性沥青在低温下有明显优势,即使PPA的加入有少许影响,但仍比普通胶粉改性沥青更优越。

3 结论

本文采用脱硫胶粉复合PPA改性剂的方式,基于响应曲面的设计方法,综合优化了改性沥青的最佳制备参数,制备了CR、DCR、CR/PPA、DCR/PPA 4种改性沥青,并比较其各项性能,得出以下结论:

(1) 根据不同DCR、PPA掺量以及剪切温度制备的改性沥青的性能参数,以橡胶沥青的高低温性能、施工和易性和储存稳定性等综合性能最优为目标,响应面输出及最终确定的最佳制备工艺为:DCR掺量21%、PPA掺量1.1%、剪切温度180℃。

(2) 相较于普通橡胶沥青,DCR/PPA复合改性沥青黏度明显下降,拌和、压实温度降低约20℃,施工和易性提升的同时大幅降低能源消耗。此外,复合改性沥青具有优良的储存稳定性,其48 h离析软化点差仅有0.85℃,体系较为均匀稳定,荧光显微镜图片也印证了这一结论。

(3) 在高低温性能方面,DCR改性沥青的高温抗变形能力较CR稍有逊色,但是加入PPA后的性能提升弥补了这一不足;另一方面,DCR改性沥青在低温下的蠕变能力更优秀,相对普通橡胶沥青来说更柔性。

(4) 关于改性机理,由于脱硫工艺的处理,橡胶粉分子键的断裂,制备的改性沥青弹性抗变形能力存在不足,但小分子脱硫胶粉与沥青的溶胀反应更为充分,形成的改性沥青体系更为均匀,离析和应力集中的可能性更小,在低温下的延展性更好;PPA对沥青的促进作用在于分散了沥青中的大分子团聚,减少了组分间的极性差异,提升了沥青体系的稳定性,同时促使沥青中胶质向沥青质的转化,弥补了DCR沥青高温性能的缺陷。

(5) 本研究制备了一种综合性能优良的脱硫胶粉/PPA复合改性沥青,首先满足了在高温条件下的使用场景,低温环境下的表现较普通橡胶沥青也更具优势。更重要的是,多聚磷酸复合脱硫胶粉改性的处理,提高了橡胶沥青的制备、储存、运输以及施工的效率,具有广阔的应用前景。但本文对复合改性沥青的性能表征仍存在不足,还需要测试短期、长期老化后沥青的性能,以评价复合改性沥青在道路服役周期内的使用效果。

参考文献:

References:

- [1] SAPUTRA R, WALVEKAR R, KHALID M, et al. Current progress in waste tire rubber devulcanization[J]. Chemosphere, 2021, 265: 129033.
- [2] 张庆宇, 康佳旺, 赵毅. 高掺量胶粉/SBS复合改性沥青混合料永久变形预估模型[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 197-202.
ZHANG Qingyu, KANG Jiawang, ZHAO Yi. Prediction model of permanent deformation of high content crumb rubber/SBS composite modified asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 197-202.
- [3] 杨三强, 孙爽, 李倩, 等. 胶粉改性沥青混合料动荷载力学响应分析[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 227-233.
YANG Sanqiang, SUN Shuang, LI Qian, et al. Dynamic load response analysis of rubber powder modified asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 227-233.
- [4] 计红颜, 颜可珍, 袁建, 等. WTR/APAO复合改性沥青层间黏结性能研究[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 178-182.
JI Hongyan, YAN Kezhen, YUAN Jian, et al. Interlayer bonding performance of WTR/APAO composite modified asphalt [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 178-182.
- [5] 郭朝阳, 何兆益, 曹阳. 废胎胶粉改性沥青改性机理研究[J]. 中外公路, 2008, 28(2): 172-176.
GUO Chaoyang, HE Zhaoyi, CAO Yang. Study on modification mechanism of waste tire rubber powder modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(2): 172-176.
- [6] PICADO-SANTOS L G, CAPITÃO S D, NEVES J M. Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118577.
- [7] 季节, 马童, 任万艳, 等. 温拌橡胶沥青降黏作用机理研究[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 168-173.
JI Jie, MA Tong, REN Wanyan, et al. Mechanism of rubber asphalt viscosity reduction by warm additives[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 168-173.
- [8] MO S C, WANG Y H, XIONG F, et al. Changes of asphalt fumes in hot-mix asphalt pavement recycling[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258(10): 120586.
- [9] MA T, WANG H, LIANG H, et al. Property characterization of asphalt binders and mixtures modified by different crumb rubbers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(7): 04017036.
- [10] 李海滨, 盛燕萍. 脱硫橡胶沥青试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(5): 50-54.
LI Haibin, SHENG Yanping. Experimental research on desulfurized rubber asphalt[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(5): 50-54.
- [11] 李晓娟, 徐希娟, 王清清. 不同基质沥青的脱硫橡胶改性沥青性能研究[J]. 中外公路, 2022, 42(5): 156-160.
LI Xiaojuan, XU Xijuan, WANG Qingqing. Study on performance of desulfurized rubber modified asphalt with

- different original asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5): 156-160.
- [12] MA T, ZHAO Y L, HUANG X M, et al. Characteristics of desulfurized rubber asphalt and mixture[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(4): 1347-1355.
- [13] 马庆伟, 郭忠印, 李文博, 等. 不同因素对橡胶复合改性沥青高温性能影响分析[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 225-230. MA Qingwei, GUO Zhongyin, LI Wenbo, et al. Analysis on the influence of different factors on the high temperature performance of composite rubber asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 225-230.
- [14] JAFARI M, BABAZADEH A. Evaluation of polyphosphoric acid-modified binders using multiple stress creep and recovery and linear amplitude sweep tests [J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(4): 859-876.
- [15] NUÑEZ J Y M, DOMINGOS M D I, FAXINA A L. Susceptibility of low-density polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 509-514.
- [16] VENKAT RAMAYYA V, VINAYAKA RAM V, KRISHNAIAH S, et al. Performance of VG30 paving grade bitumen modified with polyphosphoric acid at medium and high temperature regimes[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 157-164.
- [17] XU Y L, NIU K M, ZHU H Z, et al. Evaluating the effects of polyphosphoric acid (PPA) on the anti-ultraviolet aging properties of SBR-modified asphalt[J]. Materials, 2023, 16(7): 2784-2789.
- [18] QIAN C D, FAN W Y, REN F Y, et al. Influence of polyphosphoric acid (PPA) on properties of crumb rubber (CR) modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 117094.
- [19] WEI J G, HUANG M Y, ZHOU Y M, et al. Research of low-temperature performance of polyphosphoric acid-modified asphalt[J]. Materials, 2022, 16(1): 111-119.
- [20] YAN K Z, ZHANG H L, XU H B. Effect of polyphosphoric acid on physical properties, chemical composition and morphology of bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 92-98.
- [21] LIU S J, ZHOU S B, PENG A H. Evaluation of polyphosphoric acid on the performance of polymer modified asphalt binders[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137: 48984.
- [22] 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. Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [23] 西安公路研究院, 陕西高速机械化工程有限公司, 长安大学. 橡胶沥青路面施工技术规范: DB61/T 1021—2016[S]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. Xi'an Highway Research Institute, Shaanxi Expressway Mechanisation Engineering Co., Ltd., Chang'an University. Technical specifications for construction of asphalt rubber pavement: DB61/T 1021—2016[S]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2016.
- [24] LIANG M, XIN X, FAN W, et al. Viscous properties, storage stability and their relationships with microstructure of tire scrap rubber modified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2015, 74: 124-131.
- [25] 杨毅文, 袁浩, 马涛. 脱硫橡胶沥青溶胀原理及路用性能[J]. 公路交通科技, 2012, 29(2): 35-39. YANG Yiwen, YUAN Hao, MA Tao. Swelling principle and pavement performance of desulfurized rubber asphalt[J]. Journal of Highway Transportation Research and Development, 2012, 29(2): 35-39.
- [26] 刘大路, 陈辉强, 何青蓬, 等. PE-脱硫橡胶复合改性沥青高温性能研究[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 303-306. LIU Dalu, CHEN Huiqiang, HE Qingpeng, et al. Research on high temperature performance of modified asphalt with PE-desulfurization rubber[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(4): 303-306.
- [27] 张恒龙, 史才军, 余剑英, 等. 多聚磷酸对不同沥青的改性及改性机理研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 255-260. ZHANG Henglong, SHI Caijun, YU Jianying, et al. Modification and its mechanism of different asphalts by polyphosphoric acid[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 255-260.
- [28] 董刚. 多聚磷酸及多聚磷酸/聚合物复合改性沥青的性能和机理分析[D]. 西安: 长安大学, 2018. DONG Gang. Performance and mechanism of asphalt modified with polyphosphoric acid and polyphosphoric acid/polymer[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [29] 叶长建, 陆少毅, 黄秋山, 等. 废胶粉/天然沥青复合改性沥青流变性能与改性机理研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 219-224. YE Changjian, LU Shaoyi, HUANG Qiushan, et al. Study on rheological properties and modification mechanism of crumb rubber/natural asphalt composite modified asphalt [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 219-224.
- [30] ZHAO Z F, XIAO F P, TORALDO E, et al. Effect of crumb rubber and reclaimed asphalt pavement on viscoelastic property of asphalt mixture[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 428: 139422.
- [31] LIANG P, LIANG M, FAN W Y, et al. Improving thermo-rheological behavior and compatibility of SBR modified asphalt by addition of polyphosphoric acid (PPA) [J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 183-192.
- [32] 谭忆秋, 符永康, 纪伦, 等. 橡胶沥青低温评价指标[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 66-70. TAN Yiqiu, FU Yongkang, JI Lun, et al. Low-temperature evaluation index of rubber asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 66-70.
- [33] ALAM S, HOSSAIN Z. Changes in fractional compositions of PPA and SBS modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 386-393.