

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.06.010

羽毛改性沥青流变性能与 PG 分级研究^{*}陈通¹, 王伟²

(1.江西省交通设计研究院有限责任公司, 江西 南昌 330052; 2.湖南交通职业技术学院, 湖南 长沙 410132)

摘要:为缓解有机废料大量堆积带来的环境污染,探究聚合物改性沥青材料的流变特性,将鸭羽毛生物颗粒(DFBP)添加到基质沥青中制备生物颗粒改性沥青(ADFBP);分别制备不同 DFBP 掺量的 ADFBP 与 SBS 改性沥青(SBSMA)进行对比,通过动态剪切流变试验和低温弯曲蠕变试验研究不同 DFBP 掺量对沥青流变性能与 PG 分级的影响。结果表明,DFBP 的掺入使沥青获得更好的抗变形能力;相同改性剂质量分数下,DFBP 掺量为 2% 时 ADFBP 的性能与 3% 掺量的 SBSMA 相同;DFBP 掺量从 2% 增加到 6%,ADFBP 的 PG 分级从 82-22 提高到 94-22,但储存稳定性显著下降,建议 DFBP 的最佳掺量取 2%。采用 DFBP 制备 ADFBP 不仅可获得可持续且清洁的沥青路面,且由于生物颗粒代替 SBS 不会影响最终性能,能产生较好的经济效益。

关键词:公路;生物颗粒改性沥青;流变性能;物理性能;PG 分级

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)06-0044-05

固体废物再利用是近期全球研究热点,如何将固体废物掺入沥青中制备性能优良的改性沥青是其中研究重点。聚合物改性沥青性能的主要影响因素是其化学组成,因为它决定沥青的耐久性、抗剪切能力和黏弹性。沥青内部结构主要取决于形成胶束的树脂与沥青质含量,胶束被分散在油相中的一层碳氢化合物包围;聚合物不同的内部结构(线性、嵌段或接枝)为改性沥青赋予不同的特性;聚合物颗粒尺寸对其在沥青中的均匀分布与改性沥青良好的储存稳定性起主要作用,而剪切条件是另一关键因素,温度、时间、剪切速率与剪切设备也影响改性沥青的性能。苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS)、苯乙烯-丁二烯(SB)、苯乙烯-乙炔-丁烯-苯乙烯(SEBS)、乙烯-乙酸乙烯酯(EVA)、苯乙烯-丁二烯橡胶(SBR)及天然乳胶是常见聚合物沥青改性剂,其他改性剂如钢、玻璃、石棉纤维、湖沥青、废弃轮胎产物、木质素、矿物黏土、蒙脱土与高岭石等也常用于沥青改性。近年来,出于减少废物与环境保护的需求,对生物沥青改性剂的研究逐渐增加,如文献[14-15]探索将天然或动物废弃物用于沥青改性,但结果表明沥青的高温性能和抗老化性能有所下降。本文将鸭毛通过一定方法处理后得到鸭羽毛生物颗粒(DFBP),将 DFBP 添加到基质沥青中制备生物颗粒改性沥青(ADFBP),并将 ADFBP 与

SBS 改性沥青(SBSMA)通过动态剪切流变试验和低温弯曲蠕变试验进行对比,研究 DFBP 掺量对 ADFBP 流变性能及 PG 分级的影响,并对 ADFBP 性能进行评价,为生物改性沥青研究提供参考。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

(1) 基质沥青。采用国产 A 级 70# 沥青,其技术指标见表 1。

表 1 基质沥青的技术性能

技术指标	标准要求	检验结果
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/ (0.1 mm)	60~80	68
针入度指数	-1.5~+1.0	-1.3
软化点/℃	≥46	48.0
10℃延度/cm	≥15	37
15℃延度/cm	≥100	>100
溶解度/%	≥99.5	99.82
闪点/℃	≥260	294
60℃动力黏度/(Pa·s)	≥180	293.64
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)	实测记录	1.018
RTFOT 质量变化/%	±0.8	-0.081
后残留物 针入度比(25℃)/%	≥61	69.1
残留延度(10℃)/cm	≥6	7

* 基金项目:湖南省自然科学基金项目(2021JJ60046)

(2) SBS 改性沥青。采用自制 3% 掺量的 SBS 改性沥青 I—D,其技术指标见表 2。

表 2 SBS 改性沥青 I—D 的技术性能

技术指标	标准要求	检验结果
针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/ (0.1 mm)	40~60	54
针入度指数	≥0	0
延度(5 ℃, 5 cm/min)/cm	≥20	32
软化点/℃	≥60	74.5
闪点/℃	≥230	280
溶解度/%	≥99	99.68
弹性恢复(25 ℃)/%	≥75	88.7
运动黏度(135 ℃)/(Pa·s)	≤3	1.47
密度(15 ℃)/(g·cm ⁻³)	实测记录	1.038
储存稳定性(48 h 软化点差)/℃	≤2.5	1.5
RTFOT 质量变化/%	±1.0	-0.076
后残留物 针入度比(25 ℃)/%	≥65	74.8
残留延度(5 ℃)/cm	≥15	17

(3) 鸭羽毛生物颗粒(DFBP)。鸭毛来自湖南长沙某屠宰场。将鸭毛用水与乙醇洗净,在恒温干燥箱中干燥 24 h 后进行消毒与除臭处理。剔除鸭毛表面的倒刺与小型羽片后,用刀片式粉碎机将其剪碎,并采用球形研磨机研磨,之后过 0.075 mm 筛。经测试,其密度为 1.458 g/cm³。

(4) 鸭毛改性沥青(ADFBP)。在 600 mL 合金杯中倒入 500 mL 沥青,在 155 ℃烘箱下加热至流淌态。将其放于剪切仪下,在 180 ℃下剪切 45 min 直至 DFBP 完全分散在沥青中,分别制备 DFBP 掺量为 2%、4%、6% 的 ADFBP。

(5) 老化沥青的制备。在盛样瓶中分批次加入 35 g±0.5 g SBSMA 与 3 种 DFBP 掺量的 ADFBP,将其放入 163 ℃±0.5 ℃烘箱中 85 min,取出后倒入盛样皿中,得到短期老化沥青;将短期老化沥青 50 g±0.5 g 倒入标准薄膜烘箱试验盛样皿中,将盛样皿放入压力老化容器(PAV)中,以 2.1 MPa±0.1 MPa 的压力稳压 20 h±10 min,取出后倒入盛样皿中,得到长期老化沥青。

1.2 物理性能试验

按 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》分别对 SBSMA 及不同 DFBP 掺量 ADFBP 进行针入度、延度和软化点试验。

1.3 动态剪切流变试验

采用 Bohlin DSR 设备,在剪切应力控制模式下

分析沥青的流变特性。样品直径为 25 mm,剪切板间隙设置为 1 mm。温度扫描试验温度为 40~94 ℃,温度间隔设为 6 ℃。在应变控制模式下,设置荷载作用频率为 10 rad/s,应变为 12%;频率扫描的频率为 0.1~100 rad/s,温度为 28 ℃。

1.4 低温弯曲蠕变试验

试验仪器为 ATS RHE—102 型弯曲流变仪。采用长期老化沥青制备长×宽×高为 101.6 mm×12.7 mm×6.4 mm 的试件,将其置于设定温度的无水乙醇中恒温(-6 ℃、-12 ℃、-18 ℃、-24 ℃)放置 30 min,完成仪器校准后对小梁进行加载,加载 240 s 后卸载,通过仪器程序得出 60 s 时的劲度模量 S 和蠕变速率 m。

1.5 储存稳定性试验

将不同 DFBP 掺量的 ADFBP 过 0.3 mm 筛后加热至流淌态,每份 50 g 注入铝管中,将铝管放入 163 ℃±5 ℃烘箱中静置 48 h±1 h,加热结束后将铝管放入-12 ℃冷柜中 4 h,取出后将铝管等分剪成 3 节。分别将上节和下节放入 163 ℃±5 ℃烘箱中,取出后进行软化点试验。

2 试验结果与分析

2.1 物理性能试验

不同 DFBP 掺量 ADFBP 的物理性能指标见表 3。对比表 1、表 3 可知:相比原样基质沥青,随着 DFBP 掺量的增加,ADFBP 的针入度下降,软化点上升,延度下降,表明 DFBP 的掺入提高了沥青的刚度,使其具有更好的高温性能;DFBP 掺量从零增加到 4%时提升效果显著,掺量从 4%增加至 6%时提升较小。对比表 2、表 3 可知:2% DFBP 掺量的 ADFBP 与 SBSMA 具有相似的物理性能,表明在实际使用过程中低掺量的 ADFBP 可能可以替代低掺量的 SBSMA。

表 3 DFBP 改性沥青的物理性能

DFBP 掺量/%	针入度(25 ℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度(10 ℃)/ cm
2	57	73.8	33
4	53	74.9	28
6	51	75.6	25

2.2 流变性能分析

2.2.1 温度扫描

在沥青路面中,复数模量 G* 与路面的高温抗

车辙性能有关,相位角 δ 则反映路面的弹性响应。图1为改性沥青的复数模量 G^* 与相位角 δ 随温度的变化。

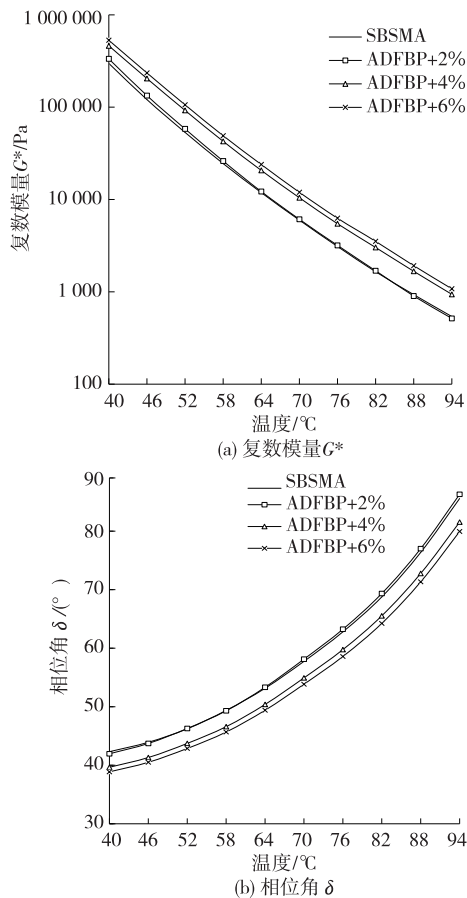


图1 改性沥青的复数模量 G^* 与相位角 δ 随温度的变化

由图1可知:随着温度的上升,改性沥青的复数模量 G^* 下降,相位角 δ 上升,表明随温度上升沥青由弹性转变为黏弹性再转变为黏性,在沥青转变为黏性后其抵抗变形能力下降。从图1(a)来看,在DFBP掺量为2%时ADFBP的流变性能与3%掺量的SBSMA相似,表明ADFBP有替代SBSMA的可能性。SBSMA在40℃下的复数模量 G^* 小于ADFBP,94℃下的复数模量 G^* 却大于ADFBP,表明ADFBP相比SBSMA其模量下降速率更快。DFBP掺量为4%时ADFBP的复数模量 G^* 显著增加,相比2%DFBP掺量的ADFBP,4%DFBP掺量ADFBP的高温性能提升显著。但6%DFBP掺量ADFBP的复数模量 G^* 相比4%DFBP掺量ADFBP增加较少,这可能是由于掺量过大,DFBP颗粒存在结团现象,难以完全分散在沥青中。从图1(b)来看,相比SBSMA,DFBP掺量为4%时ADFBP的相位角 δ 显著降低,弹性响应得到显著

改善,这是由于DFBP在沥青中形成类似于聚合物改性沥青的弹性网络,增加了改性沥青在高温下的弹性响应,进而提升了其流变性能。

2.2.2 频率扫描

图2为改性沥青的复数模量 G^* 与相位角 δ 随扫描频率的变化。

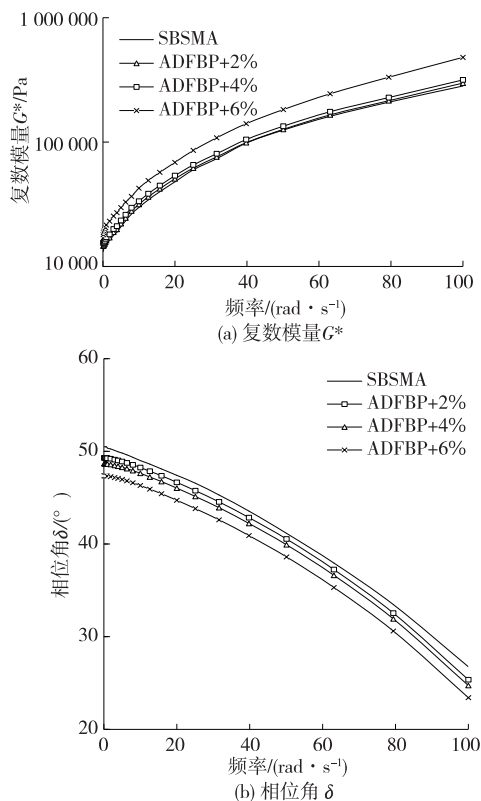


图2 改性沥青的复数模量 G^* 与相位角 δ 随频率的变化

由图2可知:频率增加时,改性沥青的复数模量增加,相位角下降,复数模量 G^* 在低频时增速较快,相位角 δ 在高频时降速较快。在角频率接近10 rad/s处,复数模量 G^* 的增速逐渐减少,表明在近10 rad/s频率以内其刚度增加较快,高温抗车辙性能较好,伴随着频率增加其刚度增长率降低。频率通常用以模拟车辆荷载对路面作用时间的长短,频率越小代表瞬时车辆荷载作用时间长,此时路面受到的剪切作用力大,相反则受到的剪切作用力小。所有ADFBP都有着比SBSMA更高的复数模量 G^* 、更低的相位角 δ ,表明ADFBP具有更好的高温抗车辙能力,且随着DFBP掺量的增加其高温性能增强,增大掺量有利于提高ADFBP的高温性能。

2.3 低温性能分析

劲度模量 S 和蠕变速率 m 通常用来评价沥青在低温下抵抗开裂的能力, S 值越小、 m 值越大其

低温性能越好。PG 分级评价中要求使用长期老化沥青制备的小梁试件的 S 值不大于 300 MPa, m 值不小于 0.3, 这种沥青才可用于比该温度环境低 10 °C 的地区。改性沥青的劲度模量 S 和蠕变速率 m 随温度的变化见图 3。

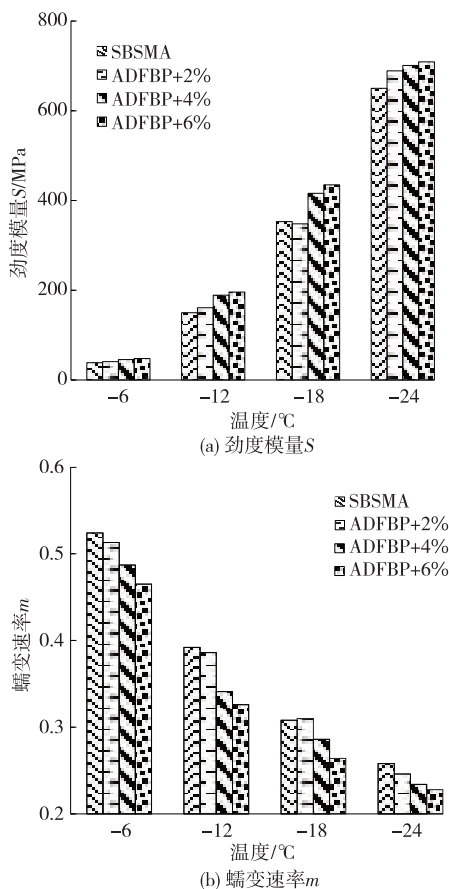


图3 改性沥青的劲度模量 S 和蠕变速率 m 随温度的变化

由图 3 可知:随着温度的降低,ADFBP 的劲度模量 S 增加,蠕变速率 m 降低。从图 3(a)来看, -6 °C 时,4 种沥青的劲度模量 S 相近;随着温度下降,SBSMA 在 -6 ~ -18 °C 时的劲度模量 S 的增速大于 ADFBP,相比 SBSMA,ADFBP 的劲度模量 S 在 -18 ~ -24 °C 时增速更大,表明在温度未低于 -18 °C 时 ADFBP 比 SBSMA 具有更好的低温抗裂性能。4%DFBP 掺量的 ADFBP 的劲度模量 S 在 -12 °C、-18 °C 下大于 2%DFBP 掺量的 ADFBP,表明随着 DFBP 掺量的增加其低温性能下降。从图 3(b)来看, -18 °C 下 SBSMA 与 2%DFBP 掺量的 ADFBP 满足蠕变速率 m 值不小于 0.3 的要求,而 -18 °C 下两者的劲度模量 S 都大于 300 MPa。综上,2%DFBP 掺量 ADFBP 与 SBSMA 有着近似的低温性能,随着 DFBP 掺量的增加,ADFBP 的低

温性能下降。按照 PG 分级要求,ADFBP 的低温性能处于 -22 °C 这一级别。

2.4 PG 等级

沥青的 PG 高温等级划分时,要求原样沥青车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 不小于 1.0 kPa 且短期老化沥青车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 不小于 2.2 kPa,这种沥青方可用于对应的高温等级中。改性沥青的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 随温度的变化见图 4。

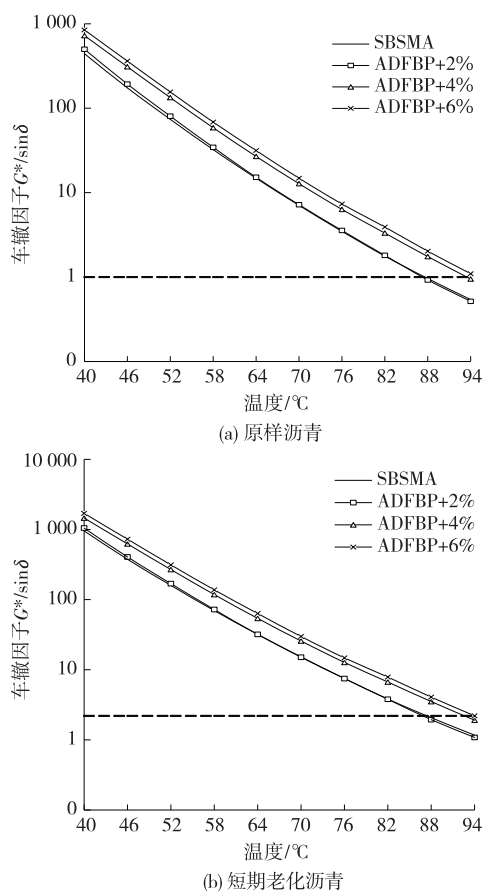


图4 改性沥青原样沥青与短期老化沥青的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 随温度的变化

由图 4 可知:随着温度的上升,改性沥青原样沥青和短期老化沥青的车辙因子逐渐下降。从图 4(a)来看,SBSMA 与 2%DFBP 掺量的 ADFBP 的高温等级为 82 °C,4%、6%DFBP 掺量 ADFBP 的高温等级分别为 88 °C、94 °C。从图 4(b)来看,SBSMA 与 2%DFBP 掺量的 ADFBP 的高温等级为 82 °C,但 SBSMA 相比 ADFBP 其车辙因子随温度升高下降速率更慢,表明 SBSMA 具有更好的抗老化能力,4%、6%DFBP 掺量 ADFBP 的高温等级分别为 88 °C、94 °C。综合前述低温等级划分结果,得出不同改性剂掺量改性沥青的 PG 等级(见表 4)。

表4 改性沥青的PG等级

改性沥青种类	PG等级
SBSMA	PG 82-22
ADFBP+2%	PG 82-22
ADFBP+4%	PG 88-22
ADFBP+6%	PG 94-22

由表4可知:在低温等级不变的情况下,随着DFBP掺量的增加,ADFBP的高温等级增加明显,可以采用6%作为DFBP最佳掺量。

2.5 储存稳定性分析

改性沥青实际应用中往往需要长途运输,而不良的储存稳定性会导致改性剂与改性沥青分离,使其无法发挥应有的性能。储存稳定性通常采用试件顶部和底部沥青软化点差值进行评价。如表5所示,2%DFBP掺量的ADFBP的软化点差值显著小于SBSMA,表明在DFBP掺量2%下ADFBP的储存稳定性优于SBSMA,这可能是由于DFBP与芳香分具有更好的相容性。4%、6%DFBP掺量的ADFBP的软化点差值分别为3.0℃、4.5℃,大于规范要求的2.5℃。虽然随着DFBP掺量的增加,ADFBP的高温性能提升显著,但综合考虑储存稳定性,建议ADFBP中DFBP改性剂最佳掺量取2%。

表5 改性沥青的储存稳定性

改性沥青种类	软化点/℃		
	顶部	底部	差值
SBSMA	74.0	75.5	1.5
ADFBP+2%	72.5	73.0	0.5
ADFBP+4%	76.5	79.5	3.0
ADFBP+6%	79.0	83.5	4.5

3 结论

分别以2%、4%、6%的掺量将生物颗粒DFBP掺入基质沥青中制备ADFBP改性沥青,并与3%掺量的SBS改性沥青进行对比,通过物理性能、流变性能、PG分级与储存稳定性分析,得出如下结论:

(1) DFBP的掺入改变了基质沥青的物理性质,其高温性能增强,且2%DFBP掺量的ADFBP具有与3%掺量SBSMA相似的物理特性。

(2) DFBP掺量为2%时,ADFBP具有与SBSMA相似的流变学特征,且伴随着DFBP掺量的增加其高温性能改善显著。

(3) 随着DFBP掺量的增加,ADFBP的低温抗裂性能略微下降,但依然保持在PG-22℃等级。

随着DFBP掺量的增加,ADFBP的高温等级的增加幅度远超过低温等级的下降幅度。

(4) 由于DFBP在基质沥青中分布更均匀,DFBP掺量2%的ADFBP相比3%掺量的SBSMA具有更好的储存稳定性;DFBP掺量增加至4%时,ADFBP的储存稳定性不满足规范要求。建议ADFBP的改性剂掺量取2%。

参考文献:

- [1] 沈金安.解决高速公路沥青路面水损害早期损坏的技术途径[J].公路,2000,45(5):71-76.
- [2] 黄彭,吕伟民,张福清,等.橡胶粉改性沥青混合料性能与工艺技术研究[J].中国公路学报,2001,14(增刊1):4-7.
- [3] TANG J C, ZHU C Z, ZHANG H L, et al. Effect of liquid ASAs on the rheological properties of crumb rubber modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2019, 194: 238-246.
- [4] DONG Z J, YANG C, LUAN H, et al. Chemical characteristics of bio-asphalt and its rheological properties after CR/SBS composite modification[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 46-54.
- [5] 林发金.考虑灰分级配的布敦岩沥青混合料精细化设计方法[J].公路,2019,64(5):247-250.
- [6] 于华洋,马涛,王大为,等.中国路面工程学术研究综述·2020[J].中国公路学报,2020,33(10):1-66.
- [7] 沈金安.论聚合物改性沥青的发展方向[J].公路交通科技,1998,15(1):4-9.
- [8] HASSANPOUR-KASANAGH S, AHMEDZADE P, FAJNLEIB A M, et al. Rheological properties of asphalt binders modified with recycled materials: A comparison with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) [J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 117047.
- [9] 李双瑞,林青,董声雄.SBS改性沥青机理研究进展[J].高分子通报,2008(5):14-19.
- [10] RIVERA-ARMENTA J L, SALAZAR-CRUZ B A, CHÁVEZ-CINCO M Y, et al. Influence of chicken feather on the rheological properties and performance of modified asphalts [J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 120128.
- [11] 胡明君,雷刚,岳阳,等.基质沥青和SEBS改性沥青低温黏结强度定量测试[J].公路,2017,62(6):260-262.
- [12] 范维玉,任施松,梁明,等.EVA分子结构对其改性沥青性能的影响[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):159-168.

(下转第54页)

4 结论

(1) 4种改性剂的最佳设计方案为:水泥净浆改性钢渣(CPSS),水灰比0.4,采取浸泡的方式处理钢渣表面;硅烷偶联剂改性钢渣(SCASS),水解配方溶液为 $m(\text{KH}-550):m(\text{水}):m(\text{乙醇})=5:45:50$,掺量4%,采用拌和法处理钢渣表面;聚乙烯醇溶液改性钢渣(PVASS),用热水配制PVA溶液,质量分数为8%,采取浸泡的方式处理钢渣表面;环氧丙烯酸改性有机硅树脂改性钢渣(EAORSS),采用 $m(\text{EAOR}):m(\text{二甲苯稀释剂})=2:1$ 配制改性剂,掺量4%,采用拌和法处理钢渣表面。

(2) 按照4种改性剂的最佳设计方案进行试验,依据吸水率、压碎值、与沥青的黏附性综合提升效果,环氧丙烯酸改性有机硅树脂(EAOR)表面处理性能最好,其次是聚乙烯醇溶液(PVA)、水泥净浆(CP),硅烷偶联剂(SCA)最差。

参考文献:

- [1] 何亮,詹程阳,吕松涛,等.钢渣沥青混合料应用现状[J].交通运输工程学报,2020,20(2):15—33.
- [2] 吴跃东,彭彝,吴龙,等.国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状[J].环境工程,2020(2):1—6.
- [3] 庞才良,杨雪晴,宋杰光,等.钢渣综合利用的研究现状及发展趋势[J].砖瓦,2020(3):77—80.
- [4] 陈宗武.钢渣理化特性及其沥青混凝土性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.
- [5] 林志伟,颜峰,郭荣鑫,等.富水环境下钢渣骨料体积膨胀行为及抑制方法研究现状综述[J].硅酸盐通报,2019,38(1):118—124.
- [6] 牟存玉,凌天清,陆亚,等.钢渣 SAC-10 沥青混合料路用性能研究[J].中外公路,2019,39(2):249—255.
- [7] 刘明金,柯望,李闯民.基于路用性能的掺钢渣透水沥青混合料设计[J].公路与汽运,2021(3):68—73+77.
- [8] 刘明金,柯望,李闯民.掺钢渣沥青混合料 AC-13 配合比优化设计[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(1):24—32.
- [9] 李闯民,李士东,柯望.不同沥青结合料的 PAC-13 混合料性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(4):1—8.
- [10] 章照宏,刘代雄,朱国军,等.沥青混凝土用钢渣集料预处理方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2014(3):103—105.
- [11] 朱光源.钢渣的膨胀性抑制方法及其路基填料路用性能的研究[D].南京:南京林业大学,2014.
- [12] 郭其杰.再生骨料强化处理以及在沥青稳定碎石中的应用研究[D].西安:长安大学,2014.
- [13] 王川.钢渣表面改性工艺及改性钢渣沥青混合料性能研究[D].昆明:昆明理工大学,2018.
- [14] 刘广生,周煜华,杨静,等.硅烷偶联剂应用研究进展[J].江西化工,2019(6):75—77.
- [15] 吴素瑶,宗翔.PVA 改性再生骨料对再生混凝土基本力学性能的影响[J].长江大学学报(自然科学版),2019,16(4):115—118.
- [16] 耿世博,邢振贤,孙培钊.改性再生骨料对混凝土基本力学性能的影响[J].四川建材,2020,46(4):1—2+4.
- [17] 朱青龙,赵启良,狄兰永.不同类型溶液对再生混凝土粗骨料的改性研究[J].科技通报,2019,35(5):149—153+158.
- [18] 吴建鹏.改性再生粗骨料混凝土耐久性试验研究[D].南昌:南昌大学,2019.
- [19] 梁鑫.基于沥青石料表面改性的油石界面粘结剂研究[D].长春:吉林大学,2011.
- [20] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [21] 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.
- [22] 中国建筑材料科学研究总院.通用硅酸盐水泥:GB 175—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.

收稿日期:2021-10-08

(上接第48页)

- [13] 肖凤,邓星鹤.沥青改性剂研究进展[J].中国胶粘剂,2020,29(9):61—66.
- [14] ZHANG R, WANG H N, GAO J F, et al. High temperature performance of SBS modified bio-asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 99—105.
- [15] ABO-SHANAB Z L, RAGAB A A, NAGUIB H M. Improved dynamic mechanical properties of sustainable bio-modified asphalt using agriculture waste[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 22(7): 1—7.
- [16] 李智文.温拌胶粉改性沥青高低温性能影响因素研究[J].公路,2020,65(10):297—303.
- [17] 单鸣宇,王岚,张宝鑫.盐冻融循环下温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能[J].建筑材料学报,2019,22(3):467—473.
- [18] FERRY J. Viscoelastic properties of polymers[M]. 3rd Edition. New York: Wiley, 1980.

收稿日期:2022-04-29