

## 活化橡胶改性沥青混合料路用性能研究

刘向东

(内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** 基于橡胶改性沥青理论,利用微波对废胶粉进行处理,探究了微波活化时间对胶粉的影响、活化废胶粉与沥青的相容性。对基质沥青、普通胶粉改性沥青、微波活化胶粉改性沥青的三大指标、弹性恢复能力、高温稳定性进行测试,并研究了微波活化胶粉改性沥青混合料的路用性能。结果表明:微波活化改性胶粉沥青的低温延展性、相容稳定性、高温稳定性、弹性恢复能力更好,微波活化胶粉沥青的离析软化点差为 $1.5^{\circ}\text{C}$ ,弹性恢复率为72%;活化废胶粉改性沥青混合料的路用性能优于普通基质沥青混合料,其高温稳定性、低温抗裂性、抗水损害能力均得到改善;就集料级配而言,间断级配AR-AC13的高温稳定性、低温抗裂性优于连续级配AR-AC13,抗水损害能力与连续级配AR-AC13相当。微波活化废胶粉有助于提升沥青混合料的路用性能。

**关键词:** 道路工程; 活化; 废胶粉; 沥青; 路用性能

随着中国汽车行业的发展,汽车保有量急剧增长,废旧轮胎存量大幅增加,对环境造成的不良影响也日益加剧。据不完全统计,2016年中国产生的废旧轮胎达到3亿条,而废旧轮胎再生利用率尚达不到50%,废旧轮胎——“黑色污染”给环境带来了巨大的压力。利用废旧轮胎加工成废胶粉,废胶粉作为沥青改性剂制备废胶粉改性沥青(Asphalt Rubber AR)运用于道路工程中,能够改善路面质量和延长路面使用年限。

国内外学者对废胶粉改性沥青及其混合料进行了大量的研究。Carl Thodesen等利用统计回归和神经网络模型研究和预测了不同胶粉种类、粒径、掺量等因

素条件下改性沥青较高温度( $135^{\circ}\text{C}$ 以上)的黏度值,结果表明:相比其他变量,上述3个独立变量对改性沥青黏度的影响最大;Nejad F M等采用传统方法和SHRP测试方法对废胶粉改性沥青、基质沥青性质进行了研究,发现废胶粉的加入使沥青的渗透性、温度敏感性、延展性、弗拉斯脆点降低,软化点、弹性恢复能力、黏附性能增强;李关龙等以AH-70#为基质沥青,以糠醛抽出油溶胀后的SBS、外掺胶粉制备复合改性沥青,对其性能进行测试,结果发现,该改性沥青在低温下更柔韧,高温下更坚硬,温度敏感性降低,抗车辙形变能力增强。

- \*\*\*\*\*
- [3] 王雅婷.钢渣集料在沥青路面超薄抗滑磨耗层中的应用研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2013.
  - [4] 周启伟.公路钢渣基层与钢渣沥青混合料路用性能研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2011.
  - [5] 秦仁杰,孙超,孙明,等.钢渣在SMA-13沥青混合料中的应用研究[J].中外公路,2015(1).
  - [6] 沙庆林.沥青混凝土矿料级配的发展方向[J].铁道建筑技术,2007(4).
  - [7] 谢勇,张逸圣,辛顺超.基于钢渣骨料的沥青混合料路用性能研究[J].公路,2014(12).
  - [8] 李旺,杨丽英,柳浩,等.钢渣在沥青路面面层中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2010(9).

- [9] Chen Z, Wu S, Wen J, et al. Utilization of Gneiss Coarse Aggregate and Steel Slag Fine Aggregate in Asphalt Mixture[J]. 2015, 93: 911-918.
- [10] 齐琳.采用间接拉伸试验评价沥青混合料低温性能研究[D].长安大学硕士学位论文,2006.
- [11] Ahmedzade P, Sengoz B. Evaluation of Steel Slag Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt Concrete[J]. J Hazard Mater, 2009, 165(1-3): 300-305.
- [12] 李建华.钢渣沥青混凝土路用性能研究[J].城市道桥与防洪,2015(5).
- [13] 虞峻玮.钢渣碎石沥青混合料路用性能研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2012.

收稿日期:2018-09-12(修改稿)

作者简介:刘向东,男,高级工程师,E-mail: lxd64work@126.com

废胶粉是由废旧橡胶经过物理粉碎而成的细小颗粒,其表面呈惰性,沥青是由碳氢化合物及其衍生物组成,沥青与废胶粉本身为热力学不相容体系,两种物质在性质上有很大差异,导致废胶粉与石油沥青相容性较差。该文对废胶粉进行微波活化处理,以增强废胶粉与沥青的相容性,通过湿法工艺制备胶粉改性沥青,研究活化废胶粉改性沥青及其混合料的性能。

1 试验

1.1 原材料及仪器

废胶粉:天津产卡车轮胎胶粉;基质沥青:韩国SK-70<sup>#</sup>,其性能如表1所示;高速剪切机1台;电热炉1台。

表 1 基质沥青性能指标

25℃针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5℃延度/ cm	弹性恢 复/%
60.7	49.2	7.8	20

1.2 废胶粉活化处理

采取微波对废胶粉进行预处理:将粒径为80目的胶粉置于60℃恒温干燥箱中脱水30 min,然后放入微波活化装置中,于300 W微波功率下活化2、3、4 min,即得微波活化废胶粉。为了使胶粉受热均匀,每次放入胶粉质量为150 g。

1.3 胶粉改性沥青制备

先将微波活化废胶粉和普通胶粉在110℃烘干待用;将基质沥青加入锅中,在电热炉上进行加热,使其成为流动态;按照14%含量将废胶粉加入到基质沥青中;调节合成温度为170℃,在转速为3 000 r/min的高速剪切机下剪切0.5 h,然后采用600 r/min机械搅拌1 h,即得胶粉改性沥青。

2 胶粉及其改性沥青性能评价

2.1 胶粉红外分析

图1为相同功率下废胶粉经过不同活化时间的红外光谱图。

从图1可以看出:470 cm<sup>-1</sup>的S-S键随着活化时间的增加,其吸收峰逐渐减弱,表明经过微波辐射后,原来交联状态的S-S键被打断,且断裂程度随着时间的增长而变大,同时红外光谱中羟基峰(3 500 cm<sup>-1</sup>左右)和羧基峰(1 680 cm<sup>-1</sup>和1 480 cm<sup>-1</sup>左右)明显

增强,说明微波辐射能够增加胶粉表面的含氧基团,使双键再生,提高胶粉的反应活性。但从图1可以看出3 min时羟基和羧基峰最大,之后又减少,说明并不是辐射时间越长,废胶粉含氧基团越多,因此该文选用活化时间为3 min。

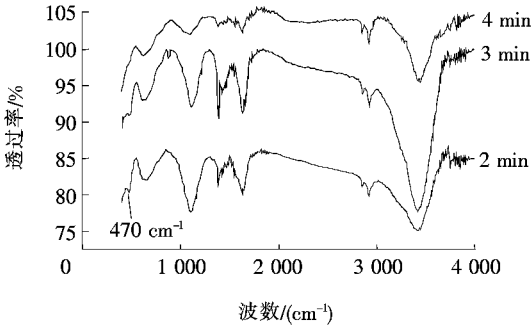


图 1 不同活化时间下胶粉红外光谱图

2.2 胶粉改性沥青三大指标

根据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中T0604—2011、T0606—2011、T0605—2011对活化胶粉沥青、普通胶粉沥青以及基质沥青进行三大指标测试,结果如表2所示。

表 2 三大指标测试结果

名称	针入度(25℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5℃ 延度/cm
基质沥青	60.7	49.2	7.8
普通胶粉沥青	44.4	53.5	14.3
活化胶粉沥青	47.5	58.0	19.5

由表2可知:加入废胶粉后沥青针入度下降,软化点升高,5℃延度增加,这主要是因为废胶粉在与沥青接触的过程中,胶粉吸收沥青中的轻组分发生溶胀,使沥青稠度变大,反映为沥青针入度下降、软化点升高,同时废胶粉在沥青中充当“桥梁”作用,使沥青与沥青分子之间交联在一起,最终反映为沥青延度增加。

2.3 弹性恢复能力和离析稳定度

根据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中T0662—2000、T0661—2011对上述3种沥青进行弹性恢复能力、离析软化点差(上层与下层软化点差值)性能测试,结果如表3所示。

表 3 3种沥青弹性恢复率和离析稳定性

名称	弹性恢复率/%	离析软化点差/℃
基质沥青	20	—
普通胶粉沥青	64	4.0
活化胶粉沥青	72	1.5

由表 3 可知:弹性恢复率大小为:活化胶粉沥青>普通胶粉沥青>基质沥青,这是因为胶粉的加入改变了沥青原有的组分和结构,同时胶粉作为分散相加入,使得沥青分子之间通过胶粉这种“桥梁”使作用力变得更强,表现出橡胶的弹性,具有比基质沥青更高的弹性恢复能力。胶粉经过微波活化后,利用微波切断废胶粉中 S—S 键达到活化的目的,使得微波活化废胶粉比普通废胶粉有更高的活性,与沥青发生溶胀时相容性更好,同时活化胶粉沥青离析软化点差要小于普通胶粉沥青,因此其相容性更好。

2.4 高温稳定性

车辙因子  $G^*/\sin\delta$  反映沥青高温抗车辙能力的大小,其值越大,表明沥青的高温稳定性越好,抗车辙能力越强。对活化胶粉沥青、普通胶粉沥青、基质沥青进行流变试验,得到各沥青 50~80 ℃ 车辙因子数据,通过车辙因子来评价其高温稳定性,结果如表 4 所示。

表 4 车辙因子  $G^*/\sin\delta$  试验结果

沥青类型	不同温度(℃)下的车辙因子/kPa						
	50	55	60	65	70	75	80
基质沥青	8.68	1.59	0.53	0.35	0.17	0.10	0.06
普通胶粉沥青	32.87	10.99	4.25	2.26	1.24	0.53	0.41
活化胶粉沥青	38.43	13.82	5.50	2.84	2.13	0.89	0.71

由表 4 可知:3 种沥青的车辙因子均随着温度的升高而减小,说明沥青的抗车辙能力随温度升高而减弱。同时,普通胶粉沥青和活化胶粉沥青车辙因子均

高于基质沥青,证明胶粉的加入提高了沥青的高温稳定性。微波活化胶粉改性沥青的车辙因子高于普通粉改性沥青,说明微波活化胶粉能与沥青较好地溶胀混合,有助于进一步提高改性沥青的高温稳定性。

3 废胶粉改性沥青混合料配合比设计

3.1 级配的确定

由于废胶粉改性沥青的特殊性,沥青混合料应该具有足够的集料间隙率容纳废胶粉改性沥青。国外研究表明:采用间断级配能够获得路用性能良好的废胶粉改性沥青混合料。基于以上考虑,选择 AR—AC13 间断级配作为废胶粉改性沥青混合料的级配类型,其级配如表 5 所示。

表 5 AR—AC13 间断级配范围

筛孔/ mm	通过率/ %	筛孔/ mm	通过率/ %
16	100	1.18	—
13.2	95.0	0.6	10.0
9.5	85.0	0.3	—
4.75	35.0	0.15	—
2.36	20.0	0.075	2.5

3.2 油石比的确定

按表 5 中的级配进行配料,其中混合料的油石比分别为 5.5%、6.0%、6.5%、7.0%、7.5%,根据马歇尔试件的体积参数、稳定度及流值等相关指标优选油石比,如表 6 所示,最终得到 AR—AC13 间断级配最佳油石比为 6.4%。

表 6 AR—AC13 马歇尔试验结果

油石比/ %	理论密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	毛体积密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	稳定度/ kN	空隙率/ %	流值/ (0.1 mm)	沥青饱 和度/%	矿料间 隙率/%
5.5	2.459	2.287	10.3	7.0	53	67.9	21.8
6.0	2.485	2.345	12.0	5.6	44	71.9	20.0
6.5	2.475	2.354	8.7	4.9	48	75.5	19.9
7.0	2.466	2.374	8.1	3.7	51	81.0	19.5
7.5	2.456	2.379	8.4	3.2	53	82.7	18.5
要求	—	—	$\geq 4.5$	4.5~6.5	20~50	70~85	$>19.0$

3.3 压实温度对混合料压实效果的影响

废胶粉增大了沥青的黏度,降低了沥青的流动性,废胶粉改性沥青混合料的拌和与压实较普通沥青混合料困难,压实温度对废胶粉改性沥青混合料的体积参

数具有较大影响。该文将研究不同压实温度(140、150、160、170 ℃)对废胶粉改性沥青混合料压实效果的影响,拌和温度为 180 ℃,以空隙率评价混合料的压实特性,具体结果如表 7 所示。

表 7 不同压实温度下的混合料体积特性

压实温度/ ℃	空隙率/ %	沥青饱和度/ %	矿料间隙率/ %
140	7.11	68.29	22.42
150	6.63	68.91	21.33
160	5.43	73.26	20.31
170	5.35	73.46	20.16

由表 7 可知:压实温度对废胶粉改性沥青混合料的体积特性具有较大影响。随着压实温度的上升,混合料的空隙率会有一定程度降低;当压实温度升高到一定程度时,混合料的体积参数基本达到稳定状态。当压实温度为 140 ℃ 时,混合料的空隙率较大,达到 7.11%,超过规范要求值。压实温度从 140 ℃ 上升到 160 ℃,废胶粉改性沥青的黏度变小,流动性变大,流

动性大的废胶粉改性沥青能与集料获得更好的压实效果。当压实温度达到 160 ℃ 以上时,废胶粉改性沥青的流动状态变化不大,混合料的空隙率基本保持稳定,上述试验结果表明废胶粉改性沥青混合料的压实温度取 160~170 ℃ 较适宜。

4 路用性能研究

4.1 高温稳定性

采用动稳定度指标评价沥青混合料的高温抗变形能力,依照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的要求进行试验,对比分析沥青、级配类型对沥青混合料抗变形能力的影响,其中连续级配 AR—AC13、AC—13 的级配选用 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中 AC—13 的级配中值,车辙试验结果如表 8 所示。

表 8 车辙试验结果

混合料类型	油石比/ %	车辙动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )			平均值/ (次·mm <sup>-1</sup> )	要求/ (次·mm <sup>-1</sup> )
		1	2	3		
间断级配 AR—AC13	6.36	3 807	3 760	3 905	3 824	≥2 400
连续级配 AC—13	4.90	1 230	1 160	1 305	1 232	≥800
连续级配 AR—AC13	7.10	2 780	2 650	2 711	2 714	≥2 400

由表 8 可知:废胶粉改性沥青混合料的动稳定度较普通沥青混合料有大幅度增长,说明废胶粉改性沥青能有效提高沥青混合料的高温抗变形能力。由于废胶粉在路面高温下仍具有高弹性,在车辆荷载的作用下,废胶粉改性沥青混合料表现出一定的弹性能力,当荷载卸去时,废胶粉改性沥青混合料形变能够得到一定程度恢复,因而剩余累积变形减少,降低了车辙深度,这与上述沥青车辙因子的试验结果相符。相对间

断级配 AR—AC13 而言,连续级配 AR—AC13 的矿料间隙率较小,没有足够的空间容纳废胶粉改性沥青,沥青混合料容易形成“悬浮—密实”结构,沥青混合料的高温稳定性会有一定程度降低。

4.2 低温抗裂性

运用小梁弯曲试验评价沥青混合料的低温性能,测定废胶粉改性沥青混合料试件在规定加载速率及温度下的弯曲破坏力学性质,试验结果如表 9 所示。

表 9 小梁弯曲试验结果

混合料类型	劲度模量/ MPa	弯拉应力/ MPa	破坏应变/ με	要求/ με
连续级配 AC—13	2 225.0	6.91	3 105.6	≥2 300
间断级配 AR—AC13	2 607.5	10.23	3 923.3	≥2 500
连续级配 AR—AC13	2 501.8	8.56	3 421.5	≥2 500

由表 9 可知:间断级配 AR—AC13、连续级配 AR—AC13 的低温弯曲破坏应变比 AC—13 大,废胶粉改性沥青混合料的低温抗裂性优于基质沥青混合料,说明沥青掺入废胶粉后,沥青混合料的低温抗裂性得

到显著改善。掺入的废胶粉增加了沥青的低温柔性,使得废胶粉改性沥青混合料在低温时的变形能力增强,沥青混合料中的温度应力得到一定程度释放;另一方面,未溶胀的废胶粉颗粒在沥青中起着增强作用,可

诱发消耗大量能量的银纹和剪切带,由此减小了废胶粉改性沥青混合料裂缝的产生。就集料级配而言,间断级配比连续级配更适用于废胶粉改性沥青混合料,集料级配可能会影响沥青胶结料的变形,造成混合料中温度应力释放的差异性。

4.3 水稳定性

水稳定性是影响沥青混合料耐久性的关键因素,采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验评价沥青混合料的水稳定性能,沥青混合料冻融劈裂和浸水马歇尔试验结果如表 10 所示。

表 10 浸水马歇尔及冻融试验结果

混合料类型	稳定度/kN		MS <sub>0</sub> / %	劈裂强度/MPa		TSR/ %
	浸水(0.5 h)	浸水(48 h)		未冻	冻融	
间断级配 AR-AC13	10.51	9.82	93.3	1.217	1.107	90.9
连续级配 AC-13	8.74	7.48	85.6	0.924	0.790	85.5
连续级配 AR-AC13	9.53	9.01	94.7	1.156	1.083	93.7

由表 10 可知:冻融劈裂试验结果与浸水马歇尔试验结果一致,均表明活化废胶粉改性沥青有利于改善沥青混合料的抗水损害能力。废胶粉改性沥青的黏度较基质沥青大,并且废胶粉改性沥青混合料的油石比较高,集料表面裹覆的沥青膜厚度较大,增强了沥青与集料之间的黏附作用,减弱了水分对沥青、集料间界面的损害。间断级配 AR-AC13 的水稳定性与连续级配 AR-AC13 的水稳定性相当,较连续级配 AC-13 而言,间断级配 AR-AC13、连续级配 AR-AC13 的抗水损害能力有一定程度增长,说明橡胶沥青有助于提升混合料的抗水损害能力。

5 结论

(1) 相比基质沥青,两种废胶粉改性沥青针入度下降、软化点和延度增加。活化废胶粉改性沥青弹性恢复率最大,达 72%,离析软化点差较小,为 1.5%,高温稳定性相比基质沥青和普通胶粉沥青更好。

(2) 压实温度对废胶粉改性沥青混合料的空隙率具有较大影响,其压实温度取 160~170℃较适宜。

(3) 较普通沥青混合料而言,活化废胶粉改性沥青混合料的路用性能有较大幅度提升,说明微波活化废胶粉有助于提升沥青混合料的路用性能。

(4) 就集料级配而言,间断级配 AR-AC13 混合料的高温稳定性、低温抗裂性优于连续级配 AR-AC13 混合料,抗水损害能力与连续级配 AR-AC13

混合料相当。

参考文献:

[1] 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(s1).

[2] Thodesen C, Shatanawi K, Amirkhanian S. Effect of Crumb Rubber Characteristics on Crumb Rubber Modified (CRM) Binder Viscosity[J].Construction & Building Materials, 2009, 23(1):295-303.

[3] Thodesen C, Xiao F, Amirkhanian S N. Modeling Viscosity Behavior of Crumb Rubber Modified Binders[J]. Construction & Building Materials, 2009, 23(9):3 053-3 062.

[4] Thodesen C, Shatanawi K, Amirkhanian S, et al. Development of an Empirical Model for Determining  $G^* / \sin \delta$  in Crumb Rubber Modified Binders[J]. Construction & Building Materials, 2009, 23(5):1 922-1 927.

[5] Nejad F M, Aghajani P, Modarres A, et al. Investigating the Properties of Crumb Rubber Modified Bitumen Using Classic and SHRP Testing Methods[J].Construction & Building Materials, 2012, 26(1):481-489.

[6] 李关龙,王枫,匡民明,等.SBS/废胶粉复合改性沥青的性能[J].华东理工大学学报:自然科学版,2016(1).

[7] 李关龙.SBS/废胶粉复合改性沥青性能的研究[D].华东理工大学硕士学位论文,2016.

[8] 肖川,凌天清.废旧橡胶粉改性沥青材料在道路工程中的应用与研究[J].公路工程,2009(4).