DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.056

环烷油温拌橡胶沥青路用性能研究

李鸿轲

（内蒙古高等级公路建设开发有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010010）

摘要：为降低橡胶沥青及混合料的制备与拌和施工温度，选用不同掺量橡胶类改性剂环烷油掺入橡胶沥青中，并进行黏温关系试验、DSR试验、基本技术指标试验、短期老化试验，分析了橡胶沥青性能随温拌剂掺量的变化趋势。制备了AR－AC－13断级配混合料进行温拌橡胶沥青混合料路用性能研究。分析结果表明：随温拌剂掺量增加，软化点下降，针入度提高，说明环烷油对橡胶沥青的高温性能有一定影响；25 ℃疲劳因子大幅下降，5 ℃延度大幅提升，说明环烷油能提高橡胶沥青的抗疲劳性与低温韧性；短期老化试验后，针入度比与延度比大幅提升，说明环烷油能较好地增强橡胶沥青的抗老化性；AR－AC－13(w)在环烷油掺量为5%～8%时，高温性能、水稳定性满足规范要求，低温韧性明显优于冬严寒区对橡胶沥青的要求。

关键词：道路工程；温拌橡胶沥青；环烷油；路用性能

随着交通运输与汽车工业的飞速发展，汽车轮胎的需求量越来越大。废旧轮胎又是一种难降解的高分子材料，比一般的固体废弃物更难处理，随意堆放将造成一系列环境问题。橡胶沥青作为一种特殊的改性沥青应运而生，不仅能有效地缓解废旧轮胎带来的“黑色”污染，还因其优良的路用性能，受到道路建设者的广泛关注，是集节能、环保和新产品开发为一体的不可再生资源回收利用的有效途径。

为保证橡胶颗粒与沥青充分反应，需要在高温下进行生产、施工，这样易造成其储存稳定性差，因此制备好的橡胶沥青需要在24 h内使用完毕。由于橡胶沥青的高黏性能以及不便控制的拌和碾压温度，将造成集料不易被橡胶沥青充分裹覆，路面压实度不足与空隙率偏大等问题，严重制约了橡胶沥青路面的工程应用。环保节能新型功能性路面材料是目前的一个研究热点，为此，将温拌技术应用到橡胶沥青以降低其混合料拌和、施工温度，同时增强其路用性能是橡胶沥青现阶段急需突破的重点。鉴于此，在保证橡胶沥青的施工温度显著降低的前提下，该文选用不同掺量的橡胶工业填充油——环烷油掺入橡胶沥青中，通过对比分析SHRP性能指标与常规技术指标测试结果，确定最优掺量的橡胶沥青温拌改性剂。

1 试验概况

1.1 试验材料

1.1.1 基质沥青

该文选用70#沥青作为母体沥青制备橡胶沥青，严格按照JTG F20－2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(简称《规程》，下同)中的试验要求测试其性能指标，试验结果如表1所示。

表1 70#基质沥青技术指标

测试项目	单位	70#	技术标准
针入度(25 ℃，100 g，5 s)	0.1 mm	70.7	60～80
软化点	℃	53.4	≥45
10 ℃延度	cm	27	≥25
15 ℃延度	cm	116	≥100
针入度指数 *PI*		－1.04	－1.5～＋1.0
60 ℃动力黏度	Pa·s	220	≥160
密度(15 ℃)	g/cm³	0.980	－
溶解度	%	99.8	≥99.5
闪点	℃	276	≥260
蜡含量	%	0.7	≤2.2
残留针入度比(25 ℃)	%	80	≥61
残留延度(10 ℃)	cm	13	≥6

收稿日期：2018－10－22

作者简介：李鸿轲，男，大学本科，高级工程师.E－mail:lhk_1966@163.com

1.1.2　橡胶沥青

采用 70# 基质沥青制备橡胶沥青，采用湿法工艺制备，将基质沥青加热至 180 ℃，掺入橡胶颗粒，70# 沥青为外掺 20%。采用高速剪切机进行搅拌，转速为 1 000 r/min，反应时间为 60 min，反应温度控制在 180～195 ℃。橡胶沥青的基本技术指标均符合交通部行业标准 JT/T 798－2011《公路工程废胎胶粉橡胶沥青》(简称《标准》，下同)，测试结果如表 2 所示。

表 2　橡胶沥青技术指标测试结果

测试项目	单位	70# AR	技术标准
针入度(25 ℃，100 g，5 s)	0.1 mm	44.1	30.0～70.0
软化点	℃	75.2	＞65
弹性恢复(25 ℃)	%	91.3	＞60
黏度(180 ℃)	Pa・s	2.9	2.5～5.0
延度(5 ℃)	cm	11.5	＞5.0

1.1.3　橡胶工业填充油——环烷油

环烷油是以环烷烃为主要成分的石油馏分，常用作橡胶型密封胶和压敏胶的软化剂，与 SBR、NBR 和 BR 有较好的共混性，为非污染型。由于其拥有饱和环状碳链结构，所以环烷油具有高密度、高黏度、无毒副作用等特点，而且一些饱和支链还连接在它的环上，因为这种特殊结构，使环烷油既具有芳香烃类的部分性质，也具有直链烃的部分性质。

其物理化学性质包括高溶解力、优异的低温性能以及与部分树脂及聚合物优良的兼容性，与橡胶良好的增塑性和互溶性。因此，环烷油可以作为温拌剂来增加胶粉颗粒在沥青中的溶胀。此外，环烷油来自天然石油，还有价格低廉、来源可靠等优点，通过初试将环烷油的掺量范围拟定为 4%～10%，共 7 个样本，每个样本间隔 1%。

1.2　试验方案

1.2.1　温拌剂掺量范围试验

通过黏度试验测试不同环烷油掺量、不同试验温度下温拌橡胶沥青的黏度，以得出合适的温拌剂掺量及温拌施工温度。进行 DSR 试验(动态剪切流变试验)，计算 70 ℃车辙因子、25 ℃疲劳因子，验证各掺量下温拌橡胶沥青的高温稳定性、抗疲劳性。通过基础技术指标(针入度、软化点、延度、弹性恢复)，判断温拌橡胶沥青随不同温拌剂掺量其性能的变化趋势，并对其进行 163 ℃下的薄膜烘箱加热试验，对其拌和施工过程中短期老化规律进行模拟研究。最后，综合分析 3 方面的试验结果，确定温拌剂的掺量范围。

1.2.2　温拌橡胶沥青混合料路用性能测试

采用马歇尔试验设计方法设计 AR－AC－13 断级配温拌橡胶沥青混合料。通过车辙试验、低温弯曲破坏试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验，测试不同温拌剂掺量下，温拌橡胶沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性，验证橡胶沥青混合料的路用性能是否满足《橡胶沥青及混合料设计施工技术指南》要求(简称《指南》，下同)。

2　试验结果分析

2.1　温拌剂掺量范围确定

对掺加环烷油温拌改性剂的 70# 橡胶沥青分别测定 135、150、165、180 ℃下的布氏旋转黏度，黏温曲线如图 1 所示。

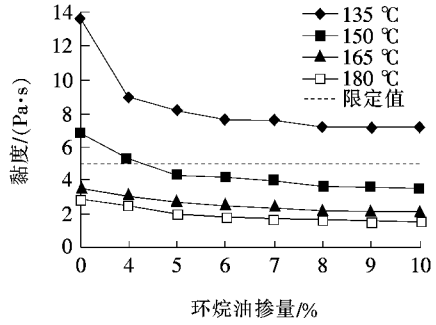

图 1　不同环烷油掺量橡胶沥青黏温曲线

由图 1 可知：环烷油具有较好的降黏效果。温拌橡胶沥青在 135 ℃各掺量超出《标准》要求的施工黏度上限值 5 Pa・s，150、165、180 ℃各掺量下的黏度测试结果基本满足要求且其黏度在环烷油掺量超过 8%后降黏幅度均趋于平缓。基于降黏效果初步分析，考虑将环烷油的掺量拟定为 5%～8%，拌和摊铺温度设置为 150 ℃。

2.2　DSR 试验结果分析

环烷油对橡胶沥青的高温稳定性能有一定影响。掺入环烷油后，橡胶沥青的 70 ℃车辙因子均有大幅下降，在掺量为 10%逼近美国沥青混合料路用性能规范对沥青的最小值限制(图 2)。因此，环烷油的掺量应控制在 9%以内。

环烷油能大幅改善橡胶沥青的抗疲劳性能。25 ℃疲劳因子越低，橡胶沥青表现出更好的抗疲劳性能。如图 3 所示，该文所试验的各环烷油掺量均能使橡胶沥青的 25 ℃疲劳因子下降 30%以上，在掺量至 8%

后，抗疲劳性的增强效果减缓。因此，建议将其掺量控制在 8%以内。

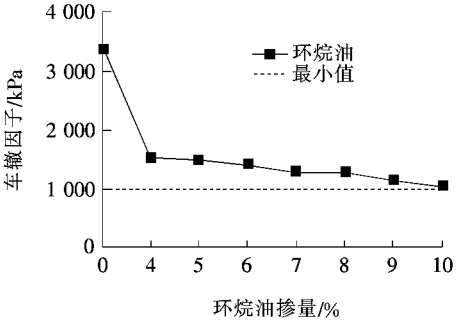

图 2 各掺量下橡胶沥青 70 ℃车辙因子

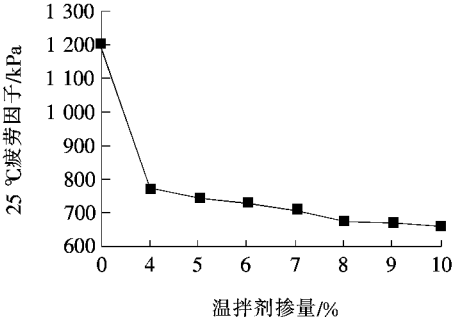

图 3 各掺量下橡胶沥青 25 ℃疲劳因子

2.3 基础技术指标

严格按《规程》对不同温拌剂掺量的橡胶沥青基础指标与老化性能进行测试，测试结果如图 4～9 所示。

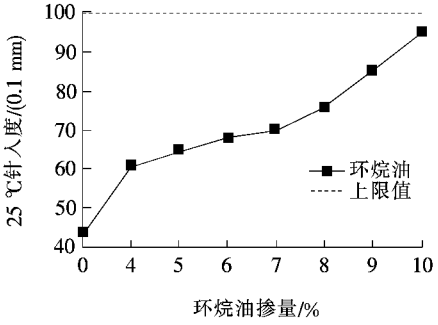

图 4 环烷油各掺量下橡胶沥青 25 ℃针入度

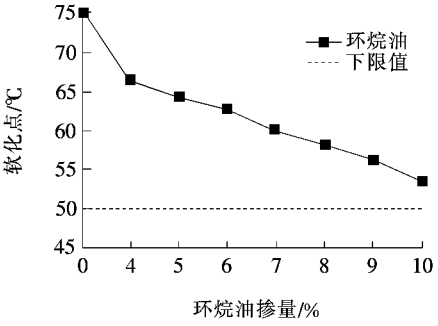

图 5 环烷油各掺量下橡胶沥青软化点

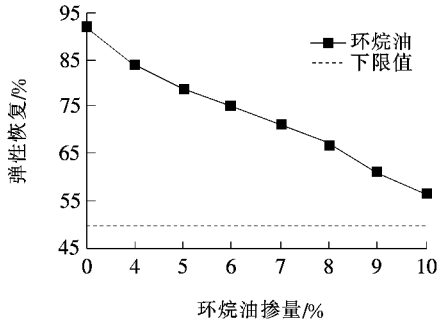

图 6 环烷油各掺量下橡胶沥青弹性恢复

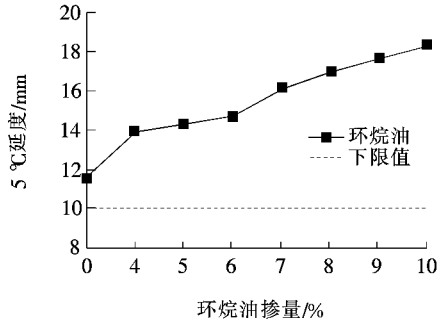

图 7 环烷油各掺量下橡胶沥青 5 ℃延度

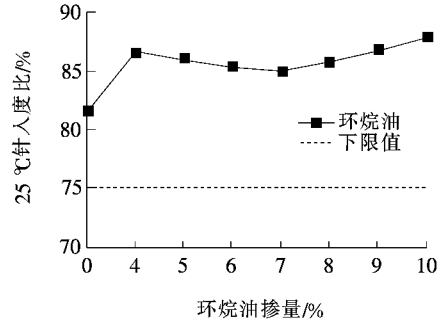

图 8 环烷油各掺量下橡胶沥青的针入度比

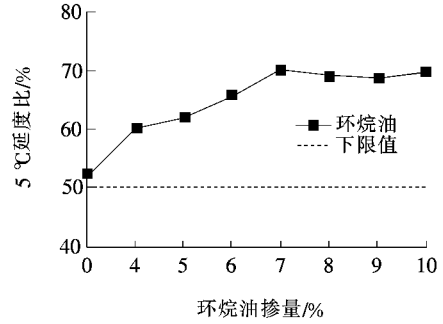

图 9 环烷油各掺量下橡胶沥青的延度比

由图 4～7 可知：① 橡胶沥青针入度随环烷油掺量逐渐增加，在环烷油掺量达到 10%时，接近规定的上限值，说明环烷油剂使橡胶沥青变得更软，黏度降低；② 软化点随环烷油掺量增加有所下降，均满足要求；③ 弹性恢复都随环烷油掺量增加而下降，说明掺

环烷油的温拌橡胶沥青弹性恢复能力低于常规橡胶沥青；④ 5℃延度有显著提升，橡胶沥青延度随环烷油掺量增加增幅加剧，说明环烷油能大幅提高橡胶沥青的低温韧性；⑤ 短期老化性能测试结果表明：橡胶沥青抗老化性能随环烷油掺量增加，其针入度比、延度比均明显提升，满足要求，但随掺量增加其增幅均呈现一定的放缓，说明环烷油能增强橡胶沥青的抗老化性能。

综合分析表明：橡胶沥青在环烷油掺量为 5%～8%时能获得综合效益较高的改善效果：70# 橡胶沥青随环烷油掺量增加：① 70 ℃车辙因子、软化点下降，针入度提高，说明环烷油对橡胶沥青的高温性能有一定影响，但均在规定范围内；② 25 ℃疲劳因子大幅下降，5 ℃延度大幅提升，说明环烷油能提高橡胶沥青的抗疲劳性与低温韧性；③ 短期老化试验表明：环烷油能较好地增强橡胶沥青的抗老化性。

3　温拌橡胶沥青混合料路用性能验证

橡胶沥青制备选用 70# 基质沥青外掺 20%、40 目胶粉，环烷油掺量为 5%～8%。粗集料、细集料、矿粉均为西南地区石灰岩，各项指标均满足行业规范要求。

3.1　温拌 AR－AC－13 混合料的制备

在前文研究的基础上，选择 AR－AC－13 断级配混合料在 150 ℃进行拌和成型，并对温拌橡胶沥青混合料[以下简称 AR－AC－13(w)]路用性能进行检验，沥青混合料合成级配见表 3。以马歇尔试验设计方法确定混合料最佳油石比为 6.4%，相应参数如表 4 所示。

表 3　AR－AC－13(w)设计级配

筛孔/mm	通过率/%	筛孔/mm	通过率/%
0.075	7.1	2.36	23.4
0.15	9.0	4.75	30.3
0.3	11.3	9.5	65.8
0.6	14.7	13.2	96.1
1.18	18.2	16	100

表 4　AR－AC－13(w)马歇尔设计结果

油石比/%	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)
6.4	5.1	18.5	75.6	7.94	31.7

3.2　高温性能

采用车辙试验对 AR－AC－13(w)高温稳定性能进行评价，试验结果如表 5 所示。

表 5　AR－AC－13(w)车辙试验结果

环烷油掺量/%	变形量/mm		相对变形/%	动稳定度/(次·mm^{-1})
	45 min	60 min		
0	1.958	2.145	4.29	2 695
5	2.681	2.871	5.74	2 653
6	2.748	2.944	5.89	2 571
7	2.773	2.972	5.94	2 533
8	2.812	3.015	6.03	2 483

相比常规橡胶沥青混合料，AR－AC－13(w)的高温性能均有所下降，根据《指南》对橡胶沥青混合料高温性能的划分，常规橡胶沥青混合料达到了重载交通上面层的高温性能，AR－AC－13(w)在 USP 环烷油掺量为 5%～7%时，均能满足中等交通上面层的使用等级。说明环烷油对橡胶沥青的高温稳定性有一定影响，但均满足规范要求。

3.3　低温性能

采用低温弯曲破坏试验评价温拌橡胶沥青的低温性能，制作 250 mm、宽 30 mm、高 35 mm 的小梁试件，采用三点加载，支点间距为 200 mm，加载速度为 5 mm/min，试验温度为－10 ℃，试验结果如表 6 所示。

表 6　低温弯曲试验结果

温拌剂掺量/%	弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/με	弯拉劲度模量/MPa
0	6.1	3 651	1 713
5	7.6	5 286	1 561
6	7.8	5 452	1 533
7	8.0	5 712	1 516
8	8.1	5 887	1 504

根据《指南》对橡胶沥青混合料低温性能的划分，各环烷油掺量下温拌橡胶沥青混合料的破坏应变均可满足冬严寒区的使用要求(大于 3 000 με)。相比于常规橡胶沥青混合料，其低温性能均明显增加。当环烷油掺量为 8%时，最大弯拉应变接近于普通橡胶沥青混合料最大弯拉应变的 1.6 倍，说明温拌橡胶沥青韧性低温下的变形能力更好，不易在低温下发生脆性断裂，环烷油能极大增强橡胶沥青低温韧性。

3.4　水稳定性

采用 JTG E20－2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》冻融劈裂试验(T0709－2011)来评价橡胶沥青混合料的水稳定性，试验结果如表 7 所示。常规橡胶沥青混合料以及温拌橡胶沥青混合料都展示出

良好的水稳定性。添加温拌改性剂后，冻融劈裂强度比均可达到规范要求。

表 7 冻融劈裂试验结果

温拌剂掺量/%	劈裂强度/MPa		冻融劈裂强度比/%
	未冻融	冻融	
0	0.77	0.71	92.2
5	0.73	0.64	87.7
6	0.72	0.63	87.5
7	0.71	0.62	87.3
8	0.70	0.61	87.1

4 结论

(1) 环烷油具有较好的降黏效果。150、165、180 ℃各掺量下的黏度测试结果基本满足要求且其黏度在环烷油掺量超过 8%后降黏幅度均趋于平缓。

(2) 橡胶沥青在环烷油掺量为 5%～8%时能获得综合效益较高的改善效果，70# 橡胶沥青随环烷油掺量增加：① 70 ℃车辙因子、软化点下降，针入度提高，说明环烷油对橡胶沥青的高温性能有一定影响，但均在《标准》规定范围内；② 25 ℃疲劳因子大幅下降，5 ℃延度大幅提升，说明环烷油能提高橡胶沥青的抗疲劳性与低温韧性。

(3) AR－AC－13(w)的路用性能均满足规范要求，在环烷油的影响下，混合料高温性能有一定减弱，低温性能得到大幅提升。当环烷油掺量为 8%时，最大弯拉应变接近普通橡胶沥青混合料最大弯拉应变的 1.6 倍；水稳定性也能满足规范要求。

参考文献：

[1] Mull M A，Stuart K，Yehia A.Fracture Resistance Characterization of Chemically Modified Crumb Rubber Asphalt Pavement[J].Journal of Materials Science，2002，37(3)：557－566.

[2] Kim H H，Lee S J.Effect of Crumb Rubber on Viscosity of Rubberized Asphalt Binders Containing Wax Additives [J].Construction & Building Materials，2015，95：65－73.

[3] 邹晓斌.Sasobit 温拌沥青混合料压实性能[J].福建交通科技，2017(2).

[4] 何亮，黄晓明，马涛.有机降黏剂温拌橡胶沥青的制作工序研究[J].公路交通科技，2013(3).

[5] 何亮，凌天清，马育，等.温拌橡胶沥青宽路用温度域流变特性[J].交通运输工程学报，2015(1).

[6] Akisetty C，Xiao F，Gandhi T，et al.Estimating Correlations between Rheological and Engineering Properties of Rubberized Asphalt Concrete Mixtures Containing Warm Mix Asphalt Additive[J].Construction & Building Materials，2011，25(2)：950－956.

[7] 魏唐中，李佩宁.Evotherm 对橡胶沥青稳定性的影响研究[J].公路与汽运，2012(5).

[8] 陈永云，孙文浩，冯逸，等.Evotherm 温拌剂对橡胶沥青老化性能的影响研究[J].华东交通大学学报，2013(6).

[9] 王闻.掺加 TOR 橡胶改性沥青及混合料技术性能研究[D].长安大学硕士学位论文，2010.

[10] 徐翚，王鹏，李华.橡胶沥青胶结料微观分析研究[J].交通标准化，2012(8).

[11] Karakurt C. Microstructure Properties of Waste Tire Rubber Composites：An Overview[J].Journal of Material Cycles and Waste Management，2015，17(3)：422－433.

[12] 房斌，吴奇峰，张争奇.橡胶改性沥青贮存稳定性及改善措施研究[J].公路，2012(3).

[13] 李欣睿，叶奋，文思源.橡胶沥青热老化性能研究[J].上海公路，2014(1).

[14] 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 & Building Materials，2015，74：124－131.

[15] 张洪林，于鹏.合成橡胶填充油概况[J].橡胶科技市场，2009(2).

[16] 田帅团.温拌剂的汇总[J].城市建设理论研究：电子版，2013(4).

[17] 张金喜，张晗，袁晓斌.不同温拌剂温拌沥青混合料力学性能对比研究[J].中外公路，2018(4).

[18] 王黎明，范一冰，郭佳龙.煤油基降黏添加剂对温拌沥青混合料的两阶段影响[J].中外公路，2017(4).