

# 就地热再生老化沥青室内外再生效果差异试验研究

徐蕾<sup>1</sup>, 裘秋波<sup>2</sup>, 陈慧亮<sup>2</sup>, 邓继<sup>2</sup>, 李宁<sup>3</sup>, 詹贺<sup>3\*</sup>

(1. 浙江嘉兴高速公路有限责任公司 嘉兴管理处, 浙江 嘉兴 314000; 2. 浙江顺畅高等级公路养护有限公司;  
3. 河海大学 土木与交通学院)

**摘要:**为研究就地热再生老化沥青室内外再生效果的差异,采用动态剪切流变仪(DSR)、弯曲梁流变仪(BBR)对比了室内外老化沥青和再生沥青的高低温流变性能,采用傅里叶红外光谱(FTIR)分析了不同状态沥青的官能团组成,并对就地热再生路面的长期使用性能进行跟踪。结果表明:现场再生利于提升再生路面抵抗高温流变变形能力,新沥青在现场施工时短期老化程度偏大,原路面老化沥青经高温加热后发生了二次老化,具体表现为失效温度升高,羰基指数和亚砷基指数增大,低温抗裂性能下降;加入再生剂后室内外再生沥青的蠕变劲度 $S$ 分别下降12.24%、9.4%,蠕变速率 $m$ 分别提高28.57%、24.13%,再生剂对室内老化沥青低温抗裂性能的改善效果优于现场再生;相比于铣刨重铺技术,就地热再生养护路段的车辙深度增长较为缓慢,疲劳裂缝比例上升较快,该现象可从室内外再生沥青流变性能的差异得以解释。

**关键词:**SMA; 就地热再生; 老化沥青; 再生效果差异; 流变性能; 微观结构

中国公路事业经过30年的高速发展现已进入建养并重时代,中国优化资源结构和改善自然环境的压力较为迫切,公路沥青路面大中修工程中产生大量高质量废旧路面材料(RAP)与石料资源短缺的矛盾日益突出,就地热再生技术因其高效、优质、环保的优势越来越受到从业人员的青睐。

研究人员对SMA沥青混合料再生做了大量研究,以期获得性能优异的再生混合料。李健采用沥青砂浆的动态流变和静态蠕变试验间接评价RAP的性能特征,选用SBR胶乳提升再生沥青混合料的长期耐久性;陈静云研发了适用于改性沥青再生的复合型再生剂,可有效改善再生沥青混合料的低温性能;马涛在就地热再生实体工程时发现经高温后的路表出现焦糊泛油现象,通过调整就地热再生设备行走速度和往返方式降低路表温度,但路表温度仍高达200℃;顾海荣等研究表明:就地热再生路面合适的加热温度为180℃,温度过高会对胶结料和骨料产生较大影响;陈锦辉针对就地热再生室内外混合料性能存在较大差异展开研究,指出级配恢复设计、施工工艺等因素对再生混合

料的性能影响较大。

目前进行就地热再生老化沥青性能恢复时通常假定再生剂与抽提老化沥青能够充分混溶,未考虑再生剂在RAP中分散不均匀以及表面层加热温度过高对原路面沥青造成的影响。因此该文针对就地热再生施工时新材料添加、原路面高温加热和复拌再生阶段等环节的沥青性能变化进行分析,采用DSR、BBR和红外光谱对比室内外再生沥青高低温流变性能和微观组成的差异,结论可为优化就地热再生老化沥青胶结料性能评价提供理论参考。

## 1 原材料与试验

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 SBS改性沥青

新沥青(VA):SBS70<sup>#</sup>改性沥青(Virgin Asphalt),主要性能指标见表1。

#### 1.1.2 老化沥青

原路面抽提沥青(LA1):浙江省某高速公路使用

收稿日期:2020-11-19(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:51708178);江苏省自然科学基金青年基金资助项目(编号:BK20170886);浙江省交通运输厅科技计划项目(编号:2018020)

作者简介:徐蕾,女,大学本科,高级工程师。E-mail:1656318794@qq.com

\*通信作者:詹贺,男,硕士研究生。E-mail:sdzczhanhe@163.com

表1 SBS改性沥青性能指标

检验项目	单位	检测值	指标要求
针入度	0.1 mm	75.4	50~80
5℃延度	cm	41	≥30
软化点	℃	82.4	≥60
RTFOT 质量损失	%	0.02	≤0.6
短期老化后 针入度比	%	74.5	≥65
(163℃, 85 min) 5℃延度	cm	21.5	≥20

年限为8年的上面层SMA-13混合料抽提沥青。

原路面高温加热抽提沥青(LA2):原路面经高温加热后表面层温度达230℃的混合料抽提沥青。

现场短期老化沥青(SA1):新沥青混合料运输至现场发生短期老化的抽提沥青。

室内模拟短期老化沥青(SA2):新SBS改性沥青在163℃的旋转薄膜烘箱(RTFOT)中老化85 min,即制得室内短期老化沥青。

### 1.1.3 再生剂

采用某渗透性轻组油分RA-5再生剂,其主要技术指标见表2。

表2 再生剂技术指标

检验项目	单位	检测值	指标要求
60℃黏度	cSt	68	50~175
闪点	℃	230	≥220
饱和分含量	%	21.07	≤30
芳香分含量	%	65.2	实测
薄膜烘箱前后黏度比		1.06	≤3
RTFOT短期老化后质量变化	%	-2.12	≤4, ≥-4

### 1.1.4 再生沥青

室内再生沥青(RA1):在原路面抽提沥青中加入6%再生剂后与新沥青按照质量比为85:15的比例混溶,然后在130℃烘箱中搅拌30 min养生,即制得室内再生沥青。

现场再生沥青(RA2):就地热再生施工时新沥青混合料添加量为15%,新旧沥青比例、再生剂添加量与RA1保持一致,取摊铺机中搅拌均匀的复拌再生混合料抽提获得的沥青,即为现场再生沥青。

## 1.2 试验

### 1.2.1 试验方案

取新沥青短期老化、旧沥青二次老化与旧沥青再生等环节的沥青进行对比分析,样品清单见表3。

表3 样品对比清单

对比过程	对比样品
新沥青短期老化	VA, SA1, SA2
旧沥青二次老化	LA1, LA2
旧沥青再生	RA1, RA2

### 1.2.2 沥青抽提方法

结合文献[7-8]中沥青回收的优化方法,采用转速变速配置的全自动抽提仪抽提,然后运用旋转蒸发法回收沥青。为了减少回收过程对沥青性能的影响,将3处不同位置混合料的抽提沥青混合后进行试验。

### 1.2.3 流变性能试验

依照美国SUPERPAVE规范,采用DSR和BBR试验评价再生沥青的高低流变性能,DSR控制应变为12%,测试温度为58、64、70和76℃,扫描频率为0.1~100 rad/s,评价指标为失效温度 $FT$ (Fail Temperature);BBR试验温度为-18℃,测试不同状态沥青的劲度模量 $S$ 和蠕变速率 $m$ 。

### 1.2.4 红外光谱试验

采用岛津IRTracer-100红外光谱仪对不同状态沥青进行红外光谱扫描。文献[9-10]研究表明:沥青老化后羰基和亚砷基吸收峰强度增大,其大小可以反映沥青的老化程度,采用羰基指数 $CI$ 和亚砷基指数 $SI$ 定量评价沥青的老化程度。 $CI$ 、 $SI$ 计算如式(1)、(2):

$$CI = A_{C=O} / A_{C-H} \quad (1)$$

$$SI = A_{S=O} / A_{C-H} \quad (2)$$

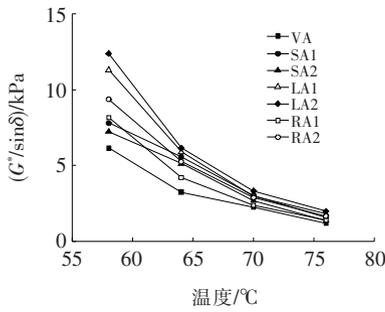
式中: $A_{C=O}$ 为 $1654\text{ cm}^{-1}$ 处羰基吸收峰面积; $A_{S=O}$ 为 $1024\text{ cm}^{-1}$ 处亚砷基吸收峰面积; $A_{C-H}$ 为 $1455\text{ cm}^{-1}$ 处饱和C-H吸收峰面积。

## 2 试验结果与分析

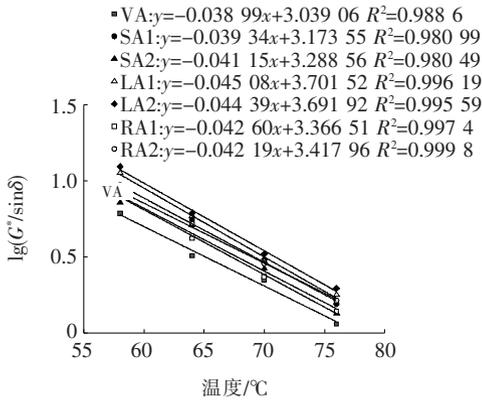
### 2.1 高温流变性能分析

DSR试验结果如图1所示,采用失效温度 $FT$ 评价不同状态沥青的高温流变性能,以车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 对数值和测试温度的关系进行线性拟合,计算 $G^*/\sin\delta = 1.0\text{ kPa}$ , $\lg(G^*/\sin\delta) = 0$ 时的温度,即得到不同状态沥青的失效温度,如表4所示。

由图1可知:沥青老化后车辙因子增大,抵抗高温流变变形的能力增强,再生剂加入后高温抗车辙能力降低,但仍高于新沥青,表明再生剂的加入仅能提升老化沥青的部分性能,再生沥青性能并不能达到新沥青



(a) 不同状态沥青的车辙因子



(b) 不同状态沥青  $\lg(G'/\sin\delta)-T$  图

图 1 DSR 试验结果

表 4 不同状态沥青的 FT

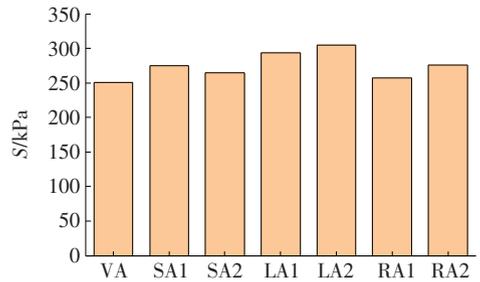
沥青类型	失效温度 FT/°C	沥青类型	失效温度 FT/°C
VA	77.94	LA2	83.17
SA1	80.67	RA1	79.03
SA2	79.90	RA2	81.01
LA1	82.11		

水平。由表 4 不同状态沥青的失效温度可知:SA1、SA2 相对于 VA 分别增长了 3.5% 和 2.5%,新沥青在现场短期老化较为严重,主要原因为新沥青混合料添加量仅占再生混合料的 15%,现场施工时新料在露天环境下存放时间过长,易发生热氧老化,高温性能提升。高温加热使原路面胶结料的失效温度升高,原路面老化沥青发生了明显的二次老化,沥青变硬变脆。加入再生剂后现场再生沥青、室内再生沥青的失效温度分别下降了 2.59% 和 3.75%,加入再生剂后老化沥青的高温性能略有降低,但仍高于新沥青和短期老化沥青,表明再生沥青的高温性能较好。从就地热再生各个施工环节沥青性能可以看出,现场再生更利于提升再生路面抵抗高温流变变形能力。

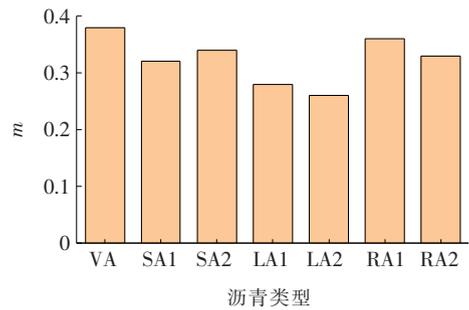
### 2.2 低温流变性能分析

采用 -18 °C 时的蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 值评价不同阶段沥青的低温流变性能,S 值越大则老化沥

青的低温弯曲流变性能越差,m 值越大则老化沥青的松弛能力越强。BBR 试验结果如图 2 所示。



(a) 蠕变劲度 S



(b) 蠕变速率 m

图 2 BBR 试验结果

由图 2 可知:沥青老化后低温蠕变劲度 S 增加,蠕变速率 m 降低,表明沥青老化后柔韧性降低,抵抗低温开裂能力下降。施工时短时间的高温加热使原路面胶结料的蠕变劲度 S 增加了 3.74%,蠕变速率 m 降低了 7.14%,低温性能下降显著。该文采用的高渗透型再生剂主要成分为分子质量较小的减四线轻质油组分,再生剂与老化沥青混溶均匀后可有效改善大小分子的相对含量,使老化沥青中的分子质量分布更为均匀,从而提高沥青的低温抗裂性能。在加入等量再生剂条件下,室内外再生沥青的蠕变劲度 S 分别下降了 12.24% 和 9.4%,蠕变速率 m 分别提高了 28.57% 和 24.13%,因此室内再生可以有效提升老化沥青的低温抗裂性,但达不到新沥青的水平。

现场再生时再生剂按照室内确定的最佳掺量喷洒到 RAP 上,不能满足恢复二次老化沥青性能的需求。再生剂在 RAP 中分散不均匀,与老化沥青的融合时间有限,很难短时间内渗透到集料表面老化沥青处,仅能实现对部分老化沥青的再生。总体上现场再生不利于提升再生路面的低温抗裂性能。

### 2.3 红外光谱分析

不同状态沥青的红外光谱见图 3,老化沥青特征峰吸收面积见表 5。

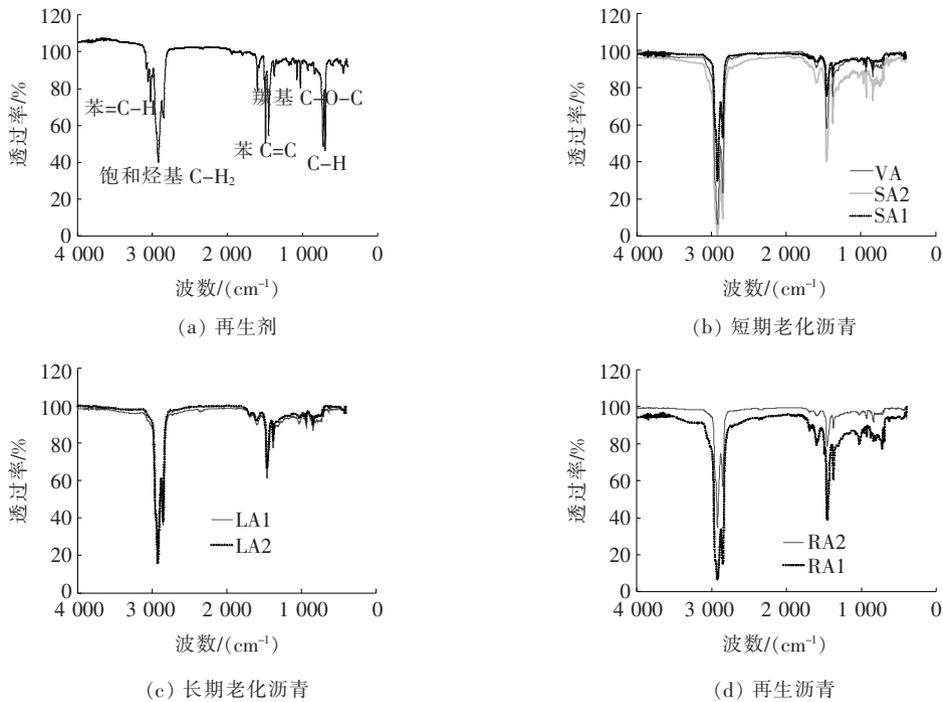


图3 FTIR 试验结果

表5 老化沥青特征峰吸收面积

沥青类型	吸收峰面积				CI	SI
	$A_{C=O}$	$A_{S=O}$	$A_{C-H}$	$A_{C=C}$		
VA	0.378	0.403	1.206	0.3101	0.313	0.334
SA1	0.584	0.587	1.057	0.2312	0.553	0.443
SA2	0.782	0.711	1.155	0.2564	0.677	0.465
LA1	0.772	0.728	1.171	0.2532	0.659	0.622
LA2	0.816	0.744	1.183	0.2373	0.692	0.658

由表5可知:沥青老化后羰基和亚砷基含量增加,羰基指数CI和亚砷基指数SI增大,丁二烯中的C=C键含量不断减小,在老化过程中沥青主要发生热氧老化,SBS改性剂不断衰减失效。短期老化沥青在 $1650$ 、 $1024\text{ cm}^{-1}$ 处均出现明显的羰基和亚砷基特征峰,现场短期老化沥青的吸收峰强度更高,老化较为严重。长期老化沥青分别在 $1720$ 、 $2853\text{ cm}^{-1}$ 处出现面积较大的酮类物质和 $-CH_2$ 对称伸缩吸收峰,表明沥青在长期老化过程中饱和分和芳香分发生了氧化反应,生成了烃的含氧衍生物醛和酮等组分,且部分高分子长链化合物发生了断链分解,双键三键发生加成反应生成 $-CH_2$ 。原路面经高温加热后老化沥青的C=C含量比原路面老化沥青降低了6.28%,羰基指数CI、亚砷基指数SI分别增长了5.1%和5.8%,说明SBS改性剂在高温加热环境下发生了加速裂解,氧化反应加剧。

由图3可知:再生剂在 $2925$ 、 $2894\text{ cm}^{-1}$ 出现了明显的 $-CH_2$ 对称和反对称伸缩振动峰,在 $1450\sim 1600$ 、 $3000\sim 3100\text{ cm}^{-1}$ 出现了芳环和苯环的骨架振动峰,说明再生剂内富含芳香分,可以补充沥青老化时芳香分的减少量,使老化沥青的分子分布更为均衡。室内再生沥青在 $1604$ 、 $1704\text{ cm}^{-1}$ 处比现场再生沥青出现了更为明显的芳环骨架振动峰,说明室内再生时再生剂与老化沥青充分渗透后实现有效再生,现场再生效果较差。再生剂在RAP中体积分散性和渗透性有待深入研究。

### 3 就地热再生长期养护效果分析

为了检验就地热再生对路面病害的长期养护效果,对比某高速公路同期使用就地热再生技术和铣刨重铺技术养护后,路面车辙和疲劳裂缝的发展规律。

#### 3.1 就地热再生对路面车辙的养护效果

就地热再生和铣刨重铺养护前后路面车辙长期统计结果见图4。

由图4可以看出:相比于铣刨重铺技术养护路段,就地热再生技术养护路段的车辙深度上升趋势更加缓慢,表明就地热再生技术对车辙的养护效果更持久,主要因为就地热再生技术充分利用了旧料,老化沥青抵抗车辙高温流变变形的能力较强,路面不易发生车辙。

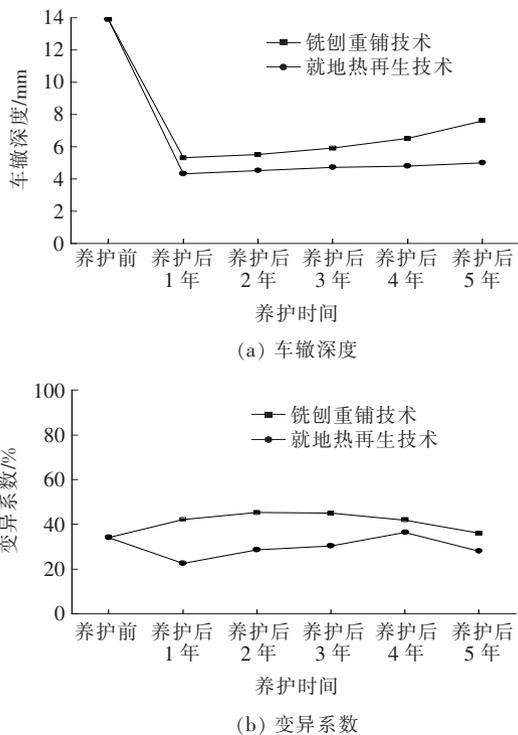


图 4 养护前后路面车辙长期统计结果

从变异系数计算结果可以看出:就地热再生技术养护施工后路段车辙深度的变异系数随着时间的推移波动较为明显,表明部分就地热再生路段压实效果不均匀,出现这种现象可能原因为高温加热后沥青老化较为严重,现场再生效果不佳,影响了路面压实效果;但采用就地热再生技术养护路段的变异系数整体低于铣刨重铺技术,体现了就地热再生技术对车辙病害的适应性。

### 3.2 就地热再生路面疲劳裂缝发展趋势

路面裂缝形态较为复杂,采用疲劳裂缝的发展趋势间接对比两种技术抵抗低温开裂和抗疲劳性能,疲劳裂缝统计结果见图 5。

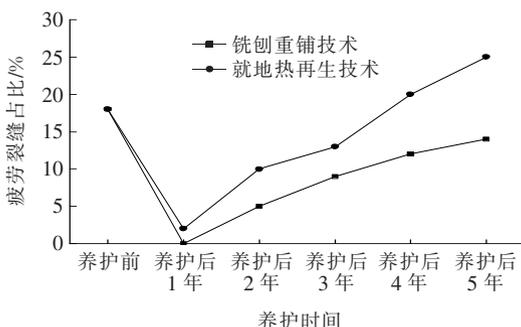


图 5 养护前后疲劳裂缝长期统计结果

由图 5 可知:相比于铣刨重铺技术养护路段,就地热再生技术养护路段的疲劳裂缝占比上升较快。由于

再生沥青的抵抗低温开裂能力低于新沥青,在低温环境下易发生低温缩裂和疲劳开裂,沥青胶结料流变性能在一定程度上可以反映路面长期使用性能。

## 4 结论

(1) 新沥青混合料在现场更易发生热氧老化,原路面老化沥青经高温加热后发生了二次老化,复拌再生过程中再生剂在 RAP 中的体积分散性和渗透性不如室内再生,这些因素均可导致室内外再生存在一定差异。

(2) 现场再生利于提升再生沥青抵抗高温流变变形的能力,现场短期老化沥青和经高温加热后的沥青失效温度升高,羰基指数和亚砷基指数增大,低温抗裂性能显著下降。

(3) 加入再生剂后,室内外再生沥青的蠕变劲度  $S$  分别下降 12.24%、9.4%,蠕变速率  $m$  分别提高 28.57%、24.13%,再生剂对室内再生沥青的低温抗裂性能改善效果优于现场再生沥青。

(4) 相比于铣刨重铺技术,就地热再生技术对车辙病害的养护效果较为显著,但易在低温环境下产生疲劳开裂,路面长期使用性能表征可以从室内外再生沥青的高低温流变性能得以解释。

## 参考文献:

- [1] 李健. 改性沥青路面就地热再生关键技术研究[D]. 东南大学博士学位论文, 2016.
- [2] 陈静云. 沥青路面再生方法的试验研究[D]. 大连理工大学博士学位论文, 2011.
- [3] 马涛. SMA 路面现场热再生技术研究[D]. 东南大学博士学位论文, 2010.
- [4] 顾海荣. 沥青路面就地热再生过程中如何实现节能高效加热[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016(5).
- [5] 陈锦辉. 就地热再生工艺室内外效果差异性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012(4).
- [6] 马涛, 黄晓明, 张久鹏. 基于复合理论的老化沥青再生规律[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008(3).
- [7] 吴建涛, 钟纯耀, 韩伟鹏. 抽提回收技术用于评价沥青老化程度的合理性研究[J]. 中外公路, 2013(6).
- [8] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [9] 李晶, 刘宇, 张肖宁. 沥青老化微观机理分析[J]. 硅酸盐通报, 2014(6).
- [10] 李晓民, 魏定邦, 姚志杰, 李波. 再生剂对老化沥青流变性能和微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2018(6).