

回收沥青混合料中木质素纤维老化性能试验研究

裘秋波¹, 马力辉¹, 刘勇², 何如宋¹, 李宁³, 唐伟³, 詹贺^{3*}

(1. 浙江顺畅高等级公路养护有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 浙江江山化工股份有限公司; 3. 河海大学 土木与交通学院)

摘要:采用纤维和纤维沥青胶浆常规性能试验评价了木质素纤维老化对吸附稳定沥青的影响,并以扫描电镜(SEM)和红外光谱(FTIR)分析了新纤维、短期老化纤维和长期老化纤维的微观形貌和官能团组成,从宏观和微观解释了回收沥青混合料(RAP)中纤维的老化过程和老化机理,并基于 Einstein 混合率理论给出了纤维补强措施。试验结果表明:纤维老化主要发生在长期使用过程中,老化纤维吸附稳定沥青的能力降低,灰分含量增加;SEM 微观形貌分析发现纤维的长径比随老化时间的延长而减小,老化纤维与沥青的增黏因子下降;红外光谱显示纤维老化后分子结构中缔合态的醇和酚羟基特征峰消失,出现了醌类、酯类物质的特征峰,纤维老化主要发生了氧化反应;添加少量新纤维可有效改善再生沥青混合料的水稳定性和低温抗裂性能,建议在就地热再生室内配合比设计时添加一定量新木质素纤维。

关键词:回收沥青混合料;木质素纤维老化;Einstein 混合率理论;纤维长径比

随着高速公路绿色养护时代的到来,RAP 的高效再生利用已成必然的发展趋势,资源环保型再生技术越来越受到人们的关注。改性沥青混合料中的沥青、纤维和改性剂在长期使用过程中均会发生一定程度老化,RAP 各部分的复合再生机理较为复杂。木质素纤维作为 SMA 沥青混合料的重要组成部分,起到了稳定纤维沥青胶浆和增加沥青膜厚度的作用,是沥青混合料结构稳定和耐久性的重要保障,可有效提升沥青混合料的水稳定性和低温抗裂性能,纤维发生老化同样会引起混合料性能衰退。

当前国内外学者针对沥青老化与再生机理研究颇多,木质素纤维老化及再生特性的研究还未引起重视。部分学者对木质素纤维老化开展了研究,马涛对 3 种不同类型的纤维进行了室内模拟老化试验,结果表明:木质素纤维的抗老化性能最差,回收木质素纤维质量相对稳定;陈静云通过优化回收工艺得到了相对完整的老化木质素纤维,试验表明纤维老化主要发生在长期使用过程中,纤维在长期随机荷载下受到的张拉状态不断改变,与沥青的黏结条件也在发生变化。该文依托浙江省某高速公路 SMA 就地热再生实体工程,从宏观和微观角度评价木质素纤维老化后的性能变

化,深入分析木质素纤维的老化过程和老化机理,并基于 Einstein 混合率理论给出纤维的补强措施,为 SMA 就地热再生木质素纤维性能评价提供理论基础。

1 原材料与试验

1.1 原材料

(1) RAP 为浙江省某高速公路使用年限为 8 年的 SMA-13 沥青混合料。

(2) 采用全自动抽提仪获取不同状态的木质素纤维,样品分别为新木质素纤维、模拟高温拌和与现场碾压摊铺的混合料抽提纤维(短期老化纤维)、原路面 RAP 抽提纤维(长期老化纤维),木质素纤维提取流程见图 1。

(3) 再生剂采用某化工企业生产的 RA-5 高渗透型再生剂。

(4) 新沥青采用 SBS-70# 改性沥青。

1.2 试验方案

(1) 为研究纤维老化对吸附稳定沥青的影响,分别从老化纤维自身物理性状和纤维沥青胶浆性能进行试验。抽提纤维分别进行吸油率、灰分含量检测;将不

收稿日期:2020-10-19

基金项目:浙江省交通运输厅科技计划项目(编号:2018020);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)

作者简介:裘秋波,男,大学本科,高级工程师。E-mail:986382585@qq.com

* 通信作者:詹贺,男,硕士。E-mail:sdzcshzhanhe@163.com

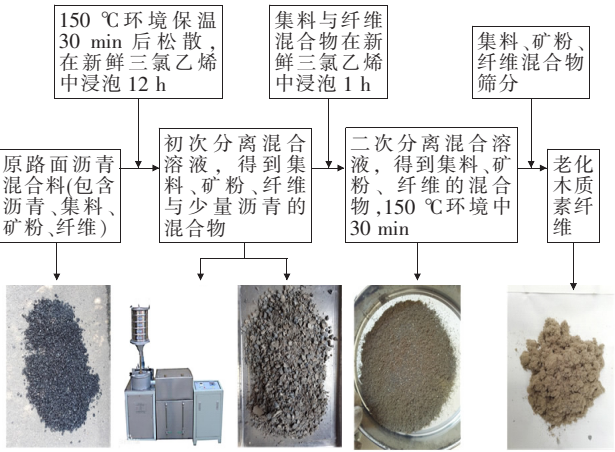


图 1 木质素纤维提取流程

同状态抽提纤维按照混合料质量的 0.1%, 即按照沥青质量的 1.8% 制备纤维沥青胶浆, 采用三大指标、黏韧性、布氏旋转黏度试验间接评价纤维的性能。

(2) 为研究新木质素纤维对再生沥青混合料性能的改善效果。首先对新沥青混合料、RAP、RAP+再生剂、RAP+再生剂+1% 新纤维、RAP+再生剂+新沥青混合料(含 3% 纤维)、RAP(+1% 新纤维)+再生剂+新沥青混合料(含 3% 纤维)进行析漏试验, 分析老化纤维对再生沥青的稳定作用以及新纤维对提升再生沥青黏聚力的改善效果; 接着对 RAP+再生剂+新沥青混合料(含 3% 纤维)、RAP(+1% 新纤维)+再生剂+新沥青混合料(含 3% 纤维)进行低温小梁弯曲试验和冻融劈裂强度试验, 分析新纤维对再生沥青混合料低温和水稳定性的改善作用。

(3) 对不同状态抽提纤维进行傅里叶红外光谱分析和 SEM 电镜扫描, 研究新纤维、长期老化纤维的官能团组成和微观形貌。

1.3 试验方法

(1) 依照 JT/T 533—2004《沥青路面用木质素纤维》标准试验方法检测木质素纤维长度、吸油率、灰分含量和 pH 值。

(2) 纤维沥青胶浆、沥青混合料性能试验依照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行。

(3) 采用岛津 IRTTracer—100 傅里叶变换红外光谱仪对不同状态纤维进行红外光谱扫描。

(4) 采用日本电子株式会社(JEOL)JSM—IT200 钨灯丝扫描电镜观察纤维的微观形貌。试验前将抽提纤维样品在 105 °C 环境下干燥 12 h, 冷却至室温后喷射金属导电层, 观察纤维的微观形貌并测量纤维直径。

2 不同状态木质素纤维性能评价

沥青作为填料和纤维的分散介质, 共同组成的沥青胶浆是保障 SMA 沥青混合料具有良好低温性能和水稳定性能的基础。沥青和木质素纤维均为有机物, 在自然环境下均会发生一定程度的老化, 导致沥青胶浆性能下降。因此在再生混合料配合比设计时考虑木质素纤维老化以及采取相应补强措施, 具有重要的指导意义。

2.1 纤维的宏观物理性状分析

新纤维、短期老化纤维、长期老化纤维的检测指标见表 1。

表 1 不同状态纤维的检测指标

项目	纤维长度/mm	灰分含量/%	pH 值	吸油率
NF	4.7	13.8	7.4	7.32
SAF	4.4	19.8	7.4	6.85
LAF	3.4	34.6	7.2	6.45
指标要求	≤6	18±5	7.5±1.0	≥纤维质量的 5 倍

注: 新纤维: New Fibers, 简称“NF”; 短期老化纤维: Short-term Aging Fibers, 简称“SAF”; 长期老化纤维: Long-term Aging Fibers, 简称“LAF”。

从表 1 可以看出: 不同状态纤维长度、灰分含量和吸油率等指标存在较大差异。短期老化纤维、长期老化纤维的平均长度相比于新纤维分别下降了 6.4% 和 27.7%。短期老化过程中新纤维与集料产生碰撞后受力过于集中, 导致部分纤维发生断裂; 纤维在长期老化状态下受到多相非均质受力体系, 在反复拉压作用下发生疲劳断裂, 长期老化过程中破坏较为明显。短期老化纤维、长期老化纤维的灰分含量是新纤维的 1.43 和 2.5 倍, 吸油率下降较为明显, 主要起到吸附稳定沥青的成分为燃烧掉的纤维, 残留的灰分主要为不挥发性杂质, 含量过多时会影响吸附沥青的能力。纤维在短期老化以及长期使用后, 吸附稳定沥青的有效纤维含量降低, 可能发生了部分失效或者转化为其他不可挥发性杂质。

采用文献[7]中木质素纤维吸油率与灰分的相关关系验证该文回收纤维的洁净性(图 2)。由图 2 可知: 抽提纤维基本上满足吸油率—灰分关系, 试验时假定抽提纤维不受残余矿粉、沥青等杂质的影响, 吸油

率、灰分含量变化主要来源于老化纤维自身的组分改变。

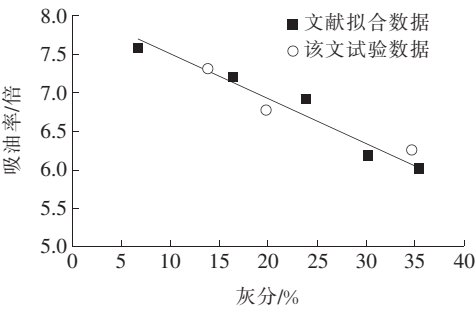


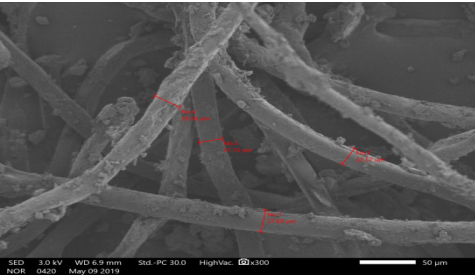
图 2 木质素纤维吸油率—灰分相关关系拟合图

2.2 木质素纤维 SEM 电镜分析

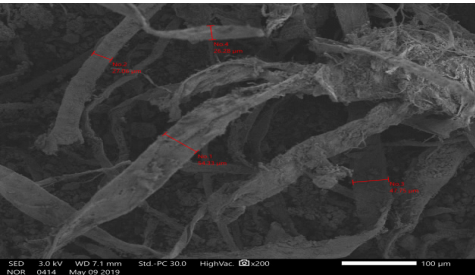
不同状态木质素纤维微观形态见图 3。纤维平均参数见表 2。



(a) 新木质素纤维(×800 倍)



(b) 短期老化木质素纤维(×300 倍)



(c) 长期老化木质素纤维(×800 倍)

图 3 纤维电镜扫描图

由表 2 可知：新纤维、短期老化、长期老化纤维的平均宽度分别为 15.48、21.13 和 38.36 μm ，宽度随老化程度的加深而增大，长期老化纤维的宽度约为新纤

表 2 纤维测量平均参数

纤维类型	长度/mm	宽度/ μm	长径比
NF	4.7	15.48	304
SAF	4.5	21.13	213
LAF	3.4	38.36	89

注：老化后的木质素纤维呈椭圆状，为方便计算取实际测量的宽度作为纤维直径，以此计算长径比。

维的 2.5 倍，纤维长期使用后发生了严重变形。一般认为纤维在受到路面长期反复疲劳应力拉伸作用下变细、变长，而该文研究表明纤维在长期使用状态下宽度增加、长度减小。主要原因为纤维在混合料中随机取向分布，在随机拉压交互荷载作用下纵横向均受到了张拉作用，老化纤维的薄弱面在纵向拉伸作用下发生断裂，导致纤维长度不断减小；在横向拉力作用下纤维由原来的中空状变成扁平实心状，横向宽度增加，此种形态不利于吸附沥青。

2.3 木质素纤维红外光谱分析

相关研究表明：木质素纤维在极端老化条件下会分解成二氧化碳、水和炭焦等物质。为了分析纤维老化后的组分变化，分别对新纤维、长期老化纤维进行红外光谱分析，结果如图 4 所示。

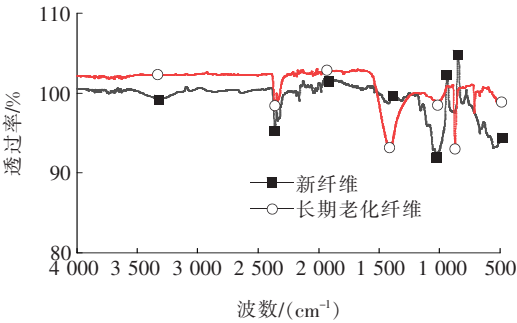


图 4 纤维红外光谱图

由图 4 可知：新木质素纤维在 $1\,460\text{ cm}^{-1}$ 处为芳香环骨架— CH_3 剪式振动峰， $2\,363\text{ cm}^{-1}$ 处为伸缩振动吸收峰， $3\,367\text{ cm}^{-1}$ 处为多缔合态的醇和酚羟基特征峰，表明木质素纤维化学结构中存在羟基、羧基和醛基等官能团。长期老化纤维消失了明显的多缔合态的醇和酚羟基特征峰，在 $1\,460\text{ cm}^{-1}$ 处出现了较大的芳香环骨架— CH_3 剪式振动峰， $1\,035\text{ cm}^{-1}$ 处的伯醇 C—O 键伸缩振动吸收峰强度降低， $1\,671\text{ cm}^{-1}$ 处出现了新的醌类物质吸收峰，该特征峰为醇羟基和酚羟基的氧化产物。官能团成分变化表明：木质素纤维老化主要发生了氧化反应，老化过程中生成了少量酯类和醌类物质。

3 纤维沥青胶浆性能评价

为进一步研究纤维老化对沥青胶浆性能的影响,

采用纤维沥青胶浆进行试验,试验结果见表 3。
由表 3 可知:少量纤维即可有效提升沥青的软化点和黏度,增强了沥青的韧性。纤维老化后纤维胶浆的韧性和黏度降低,短期老化纤维性能与新纤维较为

表 3 纤维沥青胶浆试验结果

纤维类型	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	15 ℃ 延度/cm	黏韧性/ (N·m)	韧性/ (N·m)	布氏黏度/ (Pa·s)
NS	75.4	82.4	101.2	25.1	12.8	3.24
NF	45.7	88.1	42.3	34.5	16.3	9.32
SAF	52.4	86.2	34.5	31.6	15.1	7.13
LAF	62.1	84.5	24.7	29.5	13.9	4.97

注:新 SBS 改性沥青:New Asphalt,简称“NS”。

相近,长期老化纤维性能衰退较为严重。木质素纤维的耐热温度为 230 ℃,SMA 沥青混合料拌和时混合料料温低于 190 ℃,且木质素纤维与集料的高温拌和时间较短,短期老化时仅在形态上发生了一些变化,吸油率等性能未发生明显降低。在长期路面使用状况下,纤维受到复杂的自然环境耦合老化以及车辆重复荷载的张拉应力作用后易发生加速老化。

相关研究表明:纤维的长径比会影响与沥青的增黏效果,且 Einstein 系数 K_E 与纤维长径比近似成线性相关关系,计算公式为:

$$\eta = \eta_{Gm} (1 + K_E \phi_f) \tag{1}$$

式中: η 为纤维沥青胶浆的黏度; η_{Gm} 为改性沥青黏度; K_E 为 Einstein 系数,参照文献[4]方法计算; ϕ_f 为纤维体积百分数,等于纤维体积/沥青体积。室内试验得到同等质量的短期老化纤维、长期老化纤维体积约为新纤维的 4/5、2/3。

该文通过 SEM 电镜扫描得到了木质素纤维的长径比,采用式(1)的计算方法计算纤维沥青胶浆的黏度,从试验和理论验证纤维老化对沥青增黏效果的影响,结果见表 4。

表 4 纤维沥青胶浆黏度计算值与试验值对比

纤维类型	长径比	η_{Gm}	理论 η	试验 η
NF	304	3.24	8.80	9.32
SAF	213	3.24	5.02	7.13
LAF	89	3.24	4.02	4.97

由表 4 可知:随纤维老化程度的加深,沥青胶浆的黏度降低,由于理论计算时存在部分假设,与试验值相比偏小,两者均有类似的黏度变化规律。纤维老化后

4 纤维老化对混合料性能的影响

SMA 沥青混合料中纤维沥青胶浆主要起到约束粗集料的作用,增强沥青胶浆的黏聚力可以有效增加粗集料结构的稳定性,良好的沥青胶浆是 SMA 沥青混合料低温抗裂性和水稳定性的保证。

4.1 纤维对不同沥青混合料析漏的影响

不同类型沥青混合料析漏试验结果见表 5。

表 5 不同类型沥青混合料析漏试验结果

混合料类型	析漏率/%
新沥青混合料	0.03
RAP	0.09
RAP+5%再生剂 ^①	0.12
RAP+5%再生剂+1%新纤维 ^②	0.08
RAP+再生剂+新沥青混合料(含 3%纤维)	0.07
RAP(+1%新纤维)+再生剂+新沥青混合料 (含 3%纤维)	0.04
技术要求 ^③	≤0.10

注:①再生剂掺量为 RAP 中老化沥青质量的 5%;②新纤维掺量为 RAP 质量的 1%;③技术要求依照 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》。

由表 5 可知:RAP 的析漏为新沥青混合料的 3 倍,已超过规范上限值,说明 RAP 中木质素纤维的控油能力有所下降,但仍可以起到吸附沥青的作用;加入

再生剂后沥青发生软化,老化沥青黏度降低,沥青混合料析漏增大,表明老化纤维对再生沥青的稳定作用不足;添加新纤维后可以有效降低再生混合料的析漏,补偿再生沥青降低的黏度,增强沥青胶浆的黏聚力。

4.2 纤维对沥青混合料力学性能的影响

不同类型再生沥青混合料低温抗裂性和水稳定性的试验结果见表 6。

表 6 不同类型沥青混合料力学性能试验结果

混合料类型	稳定 度/kN	冻融劈裂 强度比/%	破坏应 变/ $\mu\epsilon$
RAP+再生剂+新沥青混 合料(含 3‰纤维)	11.34	83.5	2 606
RAP(+1‰新纤维)+再生剂+ 新沥青混合料(含 3‰纤维)	13.67	87.3	2 823
技术要求	≥ 6.0	≥ 80	$\geq 2\ 500$

由表 6 可知:添加新纤维后再生沥青混合料的稳定度、冻融劈裂强度比和破坏应变均有大幅度提升,相较于未添加纤维分别增长了 20.55%、4.55% 和 7.55%,纤维的加入增强了沥青胶浆的黏聚力,SMA 沥青混合料的密实骨架结构进一步增强。断裂力学理论认为纤维和沥青在物理性混溶的情况下,可以有效提高改性沥青抵抗高温变形和低温抗裂的能力。纤维的断裂应变大大高于低温下沥青的开裂应变,即使沥青胶浆断裂,纤维也能很好地在沥青胶浆中起到桥联作用,抑制裂缝的发展,因此添加木质素纤维对再生沥青混合料低温性能和抗水损害性能具有明显的改善效果。Einstein 混合率理论认为纤维与沥青物理性结合后可以有效提升沥青的黏度,且与纤维的添加量成正比。因此为了提升再生沥青混合料的质量,建议在再生沥青混合料配合比设计时补充一定量新纤维。

5 结论

采用宏观和微观试验对老化纤维的性能进行了评价,得到以下结论:

(1) RAP 中的长期老化纤维吸油率下降、灰分含量增加,性能衰减较为严重。根据 Einstein 混合率理

论建议在 RAP 中添加一定量新纤维来改善再生沥青混合料的性能。

(2) 短期老化纤维的性能衰减不大,纤维受长期拉压交互荷载和环境的影响较大,性能衰减主要发生在长期老化阶段。

(3) 从纤维 SEM 微观形貌图发现纤维老化后长径比减小,与沥青的增黏效果下降,影响了沥青胶浆与集料的黏聚力。

(4) 纤维老化后缔合态的醇和酚的羟基特征峰消失,亚砷基特征峰含量降低,出现了醌类、酯类物质的特征峰,可以看出纤维在老化过程中发生了氧化反应,官能团组成发生了改变。

参考文献:

[1] 马涛,黄晓明,赵永利. SMA 路面就地热再生关键技术[M]. 北京:科学出版社,2016.

[2] 赵武辉. 纤维增强沥青混合料性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2009.

[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] 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.

[5] JT/T 533—2004 沥青路面用木质素纤维[S].

[6] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[7] 游玉石. 路用木质素纤维的研制与应用[D]. 东南大学硕士学位论文,2011.

[8] 熊锐,陈拴发,关博文,等. Miber I 型矿物复合纤维沥青混合料路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2011(7).

[9] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].

[10] 陈惊宇,武翔云. 基于 DMA 方法的老化沥青胶浆—集料界面粘附性研究[J]. 中国战略新兴产业,2018(28).

[11] 付力强,王子灵,张锐. SBS 与纤维在沥青及沥青混凝土中改性效果对比分析[J]. 公路交通科技,2007(5).

[12] 陈明星,张俊,兰建丽,等. 复合纤维对沥青胶浆的增黏作用分析[J]. 山西交通科技,2014(3).

[13] 田彪,陈思危,宋玮晔,等. 木质素纤维对水溶液中 Cr⁶⁺的吸附[J]. 林业机械与木工设备,2019(2).

[14] 邹桂莲,秦欢,吴欣. 阿布森回收 SBS 改性沥青的试验研究[J]. 中外公路,2020(2).