

玉米秸秆纤维制备工艺优化及 改性沥青胶浆流变性能研究

谢丹丹¹, 王琨^{1*}, 李强飞¹, 孙星辰¹, 姜自玉¹, 唐亮²

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014

摘要:为促进农业固体废弃物在道路工程中的高值化利用,提出一种玉米秸秆纤维制备及改性工艺。在 NaOH 与水的质量比为 4%、5%、6%, 蒸煮 0.5、1.0、1.5 h, 浸泡 0.5、1.0、1.5 h 的纤维改性参数条件下,基于正交试验并通过极差分析和方差分析研究改性参数对纤维吸油性与耐热性的协同影响,进行动态剪切流变和弯曲梁流变试验,测定未改性玉米秸秆纤维、改性玉米秸秆纤维、木质素纤维以及无纤维沥青胶浆的高、低温流变性能,验证玉米秸秆纤维替代木质素纤维的技术可行性。结果表明:NaOH 改性处理可显著提高玉米秸秆纤维的吸油率并降低其质量损失,各改性参数对纤维吸油性和耐热性的影响程度及显著性按从大到小顺序排列依次为蒸煮时间、NaOH 与水的质量比、浸泡时间;玉米秸秆纤维的最佳改性工艺组合为 NaOH 与水的质量比为 6%、蒸煮 1.5 h、浸泡 1.5 h;最佳改性工艺条件下,改性玉米秸秆纤维的吸油率比木质素纤维增大 1.54%、质量损失率减小 84.88%;改性玉米秸秆纤维沥青胶浆的复数模量、车辙因子和松弛速率比木质素纤维沥青胶浆分别增大 20.80% (48 ℃)、21.95% (48 ℃) 和 5.27% (-12 ℃),二者的蠕变劲度相当。玉米秸秆纤维用于沥青改性兼具高温稳定性与低温抗裂性,可替代木质素纤维用于沥青路面施工中。

关键词:玉米秸秆纤维;极差分析;方差分析;沥青胶浆;流变性能

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)05-0062-09

引用格式:谢丹丹,王琨,李强飞,等.玉米秸秆纤维制备工艺优化及改性沥青胶浆流变性能研究[J].山东交通学院学报,2025,33(5):62-70.

XIE Dandan, WANG Kun, LI Qiangfei, et al. Optimization of corn straw fiber preparation process and rheological properties of modified asphalt mastic[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(5): 62-70.

0 引言

在沥青混合料中掺加纤维可显著提高路面的高温抗车辙、低温抗裂性能及疲劳寿命等^[1]。木质素纤维因沥青吸附性能优异已成为碎石玛蹄脂沥青(stone mastic asphalt, SMA)路面应用最广泛的纤维材料^[2],但其原料主要来源于木材,在路面施工中大规模应用将加剧森林资源消耗。玉米秸秆富含纤维素与木质素,二者在秸秆中的质量分数分别为 40%~65%、15%~30%。玉米秸秆年产量巨大,是极具开发潜力的木质生物质资源。当前主要通过焚烧和填埋处置秸秆,不利于环境保护和可持续稳定发展^[3-5]。

将玉米秸秆制成纤维材料掺入沥青,可提高沥青混合料的路用性能^[6]。李振霞等^[7]通过家用粉碎机制备玉米秸秆纤维,将玉米秸秆纤维掺入沥青制备玉米秸秆纤维改性 AC-16 沥青混合料,沥青混合料的

收稿日期:2025-03-29

基金项目:山东省交通运输科技计划项目(2023B65)

第一作者简介:谢丹丹(2000—),女,山东单县人,硕士研究生,主要研究方向为道路交通运输,E-mail:3241525042@qq.com。

*通信作者简介:王琨(1978—),女,山东平原人,教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为道路结构与材料,E-mail:wangkun@sdjtu.edu.cn。

动稳定度增大约 20.0%,弯拉应变增大约 3.5%。玉米秸秆纤维表面含大量羟基等极性官能团,与沥青界面相容性较差,需通过改性处理调控其表面特性^[8]。采用碱液处理玉米秸秆纤维,通过脱除半纤维素、增大比表面积及引入活性位点可显著增强玉米秸秆纤维与沥青界面的黏附性,成为低成本、高性能的理想改性材料^[9-11]。盛博晗等^[12]发现 NaOH 溶液改性后的竹纤维沥青胶浆的吸油性、耐热性、疲劳性能均得到改善。Wang 等^[13-14]对改性玉米秸秆纤维、木素纤维和普通沥青混合料进行车轮跟踪试验、低温弯曲试验、水浸马歇尔试验、冻融劈裂试验和疲劳试验,改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.2%对沥青混合料的路用性能、黏弹性性能和动载下蠕变性能的影响最好,黏弹性延迟时间最长,应变峰值和车辙深度最小,黏弹性、蠕变性能和长期高温性能最好。任德志等^[15]设计辊齿式碾压揭皮辊,实现玉米秸秆皮瓢有效分离。目前,大多采用小型粉碎机制备路用秸秆纤维,难以实现规模化生产,纤维改性工艺的研究集中于单一变量的影响,如 NaOH 与水的质量比,未系统探究不同改性工艺参数对不同纤维路用性能的协同影响。

本文采用皮穗分离设备、秸秆破碎设备与蒸煮设备制备玉米秸秆纤维,采用 NaOH 溶液对其进行改性处理,分析 NaOH 与水的质量比、蒸煮时间及浸泡时间对玉米秸秆纤维吸油率和质量损失率的影响,并与木质素纤维的基本属性相比,探究改性玉米秸秆纤维沥青胶浆的高、低温流变性能,评估玉米秸秆纤维的替代可能性,为其在道路工程中的规模化应用提供参考。

1 玉米秸秆纤维制备与改性工艺

1.1 制备与改性工艺流程

按宏观形态可将玉米秸秆分为外皮、髓芯和叶片 3 部分。髓芯和叶片部分含有丰富的半纤维素及可溶性碳水化合物^[15],力学性能显著低于以纤维素/木质素为主的外皮组织^[16]。以玉米秸秆外皮作为纤维原料,去除低强度组分髓芯、叶片,提高纤维基复合材料的机械性能^[17]。

为保证玉米秸秆纤维的制备质量,选择山东省德州市自然风干、表面干净、无损害且未发霉的玉米秸秆作为试验原材料。去除玉米秸秆的叶片、根等杂质,采用皮穗分离机提取秸秆外皮,获得长 5~10 cm 的秸秆皮片段;将其放入多功能秸秆破碎机(筛网孔径为 3 mm)进行破碎处理,得到粗糙纤维;选择边长为 0.6 mm 的标准方孔筛筛分粗纤维,收集筛选出来的较细玉米秸秆纤维并装袋备用,将方孔筛上余下的玉米秸秆纤维返回破碎机进行二次处理;将过筛的玉米秸秆纤维置于不同 NaOH 溶液(NaOH 与水的质量比不同)中蒸煮,随后继续浸泡一定时间;用流水冲洗玉米秸秆纤维,去除玉米秸秆纤维表面残留的 NaOH 溶液;将玉米秸秆纤维放入温度为 105 ℃的烘箱中干燥至恒重,密封储存备用。玉米秸秆纤维的制备及改性工艺流程如图 1 所示。

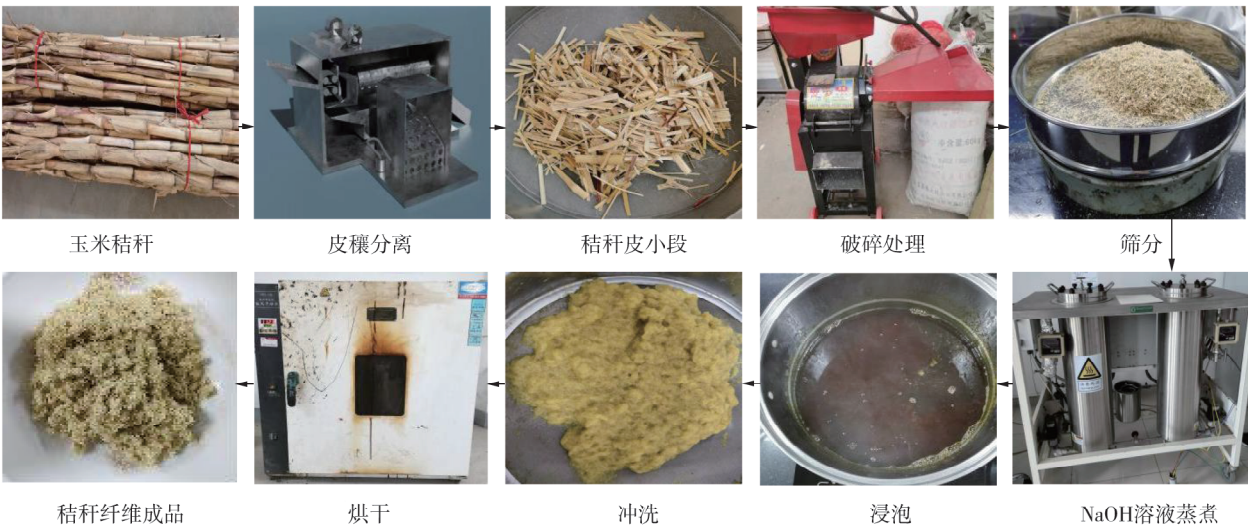


图 1 玉米秸秆纤维的制备与改性工艺流程

1.2 试验方法

1.2.1 正交试验设计

为制备合格的路用纤维材料并确定玉米秸秆纤维的最佳改性工艺,设计三因素三水平正交试验,分析 NaOH 与水的质量比(因素 A)、蒸煮时间(因素 B)和浸泡时间(因素 C)对玉米秸秆纤维的吸油率及耐热性的影响规律,正交试验因素水平如表 1 所示。假设三因素间不存在交互作用,采用标准正交表 $L_9(3^4)$ 设计试验,正交试验方案如表 2 所示。

表 1 正交试验因素水平表			
水平	A/%	B/h	C/h
1	4	0.5	0.5
2	5	1.0	1.0
3	6	1.5	1.5

表 2 正交试验方案

试验编号	A	B	C	D	试验编号	A	B	C	D
1	1	1	1	1	6	2	3	1	2
2	1	2	3	2	7	3	1	2	2
3	1	3	2	3	8	3	2	1	3
4	2	1	3	3	9	3	3	3	1
5	2	2	2	1					

注:D 为误差,是由所有未被控制的随机因素和未知因素引起的试验结果的随机波动。

1.2.2 吸油率试验评价指标

植物纤维凭借多孔结构及高比表面积可高效吸附沥青^[18],吸油率是评价植物纤维吸附能力的关键指标^[19]。高吸油率可提高沥青混合料中结构沥青的占比,抑制沥青迁移,减少泛油并提高沥青混合料的高温稳定性,提高高温抗车辙能力。基于煤油吸附法^[20]测定吸油率,优化玉米秸秆纤维制备工艺。玉米秸秆纤维吸油率

$$P_{OA} = (m_3 - m_2 - m_1)/m_1,$$

(1)

式中: m_1 为干燥玉米秸秆纤维的质量, m_2 为标准试样筛的质量, m_3 为吸附煤油后玉米秸秆纤维与标准试样筛的总质量。

1.2.3 耐热性试验评价指标

路用纤维需具备高温稳定性,保证其在拌和、运输及摊铺过程中不发生热降解或结构损伤。以质量损失率为评价指标,通过耐热性试验优化纤维制备工艺。质量损失率越小,纤维热降解风险越小,沥青混合料施工均匀性越好。

玉米秸秆纤维质量损失率

$$E_1 = 100\% \times (m_4 + m_5 - m_6)/m_5,$$

(2)

式中: m_4 为坩埚的质量, m_5 为玉米秸秆纤维的质量, m_6 为加热后坩埚和玉米秸秆纤维的总质量。

2 试验结果与分析

2.1 正交试验

基于正交试验设计制备改性玉米秸秆纤维,测试不同因素水平组合下玉米秸秆纤维的吸油率与质量损失率,试验编号 1~9 对应的改性玉米秸秆纤维的吸油率分别为 5.395、5.875、6.016、5.553、5.758、6.186、5.896、6.365、6.899 g/g,质量损失率分别为 2.136%、1.742%、1.117%、1.763%、1.336%、0.912%、1.373%、1.174%、0.636%。第 9 组试样的吸油率最大且质量损失率最小,综合性能最优;各玉米秸秆纤维试样的吸油率均满足 5.000~9.000 g/g,质量损失率均满足不大于 6.000%的要求^[20]。

2.2 极差分析

极差分析是指量化各因素对技术指标的敏感性,确定其影响主次顺序。对改性玉米秸秆纤维的正交试验结果进行极差分析,计算结果如表 3、4 所示。极差 R 越大,表明该因素水平变化引起的技术指标波动范围越大,其影响越显著^[21]。比较某因素各水平的平均影响 k_i ,确定不同水平对玉米秸秆纤维技术指标的影响程度, k_i 越大,该因素处于 i 水平时对玉米秸秆纤维评价指标的影响越大。

表 3 吸油率正交试验极差分析							单位:g/g
因素	K_1	K_2	K_3	k_1	k_2	k_3	R
A	17.286	17.497	19.160	5.762	5.832	6.387	0.625
B	16.844	17.998	19.101	5.615	5.999	6.367	0.752
C	17.946	17.670	18.327	5.982	5.890	6.109	0.219
D	18.052	17.957	17.934	6.017	5.986	5.978	

注: $K_i(i=1,2,3)$ 为某因素在第 i 水平下的试验结果总和, k_i 为该因素在第 i 水平下对评价指标的平均贡献值,极差 R 为该因素在 k_i 中的最大值与最小值之差。

表 4 质量损失率正交试验极差分析							单位:%
因素	K_1	K_2	K_3	k_1	k_2	k_3	R
A	4.995	4.011	3.183	1.665	1.337	1.061	0.604
B	5.272	4.252	2.665	1.757	1.417	0.888	0.869
C	4.222	3.826	4.141	1.407	1.275	1.380	0.132
D	4.108	4.027	4.054	1.369	1.342	1.351	

由表 3、4 可知:玉米秸秆纤维的吸油率和质量损失率的极差从大到小排序依次为蒸煮时间、NaOH 与水的质量比、浸泡时间,蒸煮时间对 NaOH 改性玉米秸秆纤维的吸油性和耐热性影响最显著,其次为 NaOH 与水的质量比,浸泡时间影响最小。NaOH 与水的质量比为 6%、蒸煮 1.5 h、浸泡 1.5 h 时,对改性玉米秸秆纤维吸油率的影响最大;NaOH 与水的质量比为 4%、蒸煮 0.5 h、浸泡 0.5 h 时,对改性玉米秸秆纤维质量损失率的影响最大。吸油率是改性玉米秸秆纤维的核心指标^[22],结合正交试验结果与极差分析结论,最终确定各因素的最优组合为 $A_3B_3C_3$,即 NaOH 与水的质量比为 6%、蒸煮 1.5 h、浸泡 1.5 h。

NaOH 与水的质量比和蒸煮时间均与吸油率正相关,表明适度增大 NaOH 与水的质量比、蒸煮时间,可有效提高改性玉米秸秆纤维的吸附性能,其中蒸煮时间对改性玉米秸秆纤维的吸油率的影响最大,分别蒸煮 1.0、1.5 h 时,改性玉米秸秆纤维的吸油率比蒸煮 0.5 h 分别增大 6.84%、13.39%。在一定浸泡时间范围内,改性玉米秸秆纤维的吸油率均较大,随着浸泡时间的延长,改性玉米秸秆纤维的吸油率略增,浸泡时间由 0.5 h 增至 1.5 h 时,改性玉米秸秆纤维的吸油率增大 2.12%。

随着 NaOH 与水的质量比和蒸煮时间的增大,改性玉米秸秆纤维的质量损失率大幅减小,表明适当提高 NaOH 与水的质量比,延长蒸煮时间可显著降低改性玉米秸秆纤维的热降解风险。蒸煮 1.0、1.5 h 时,改性玉米秸秆纤维的质量损失率比蒸煮 0.5 h 分别减小 19.35%、49.46%,对改性玉米秸秆纤维耐热性能的影响最明显。NaOH 与水的质量比为 6%、蒸煮 1.5 h、浸泡 1.5 h,改性玉米秸秆纤维的质量损失率相对最小,耐热性能最佳。增加浸泡时间对改性玉米秸秆纤维的耐热性能的影响较弱,浸泡 1.5 h 时,玉米秸秆纤维的质量损失率为 1.380%,满足文献[20]的要求。

2.3 方差分析

极差分析虽能快速确定各因素的主次顺序及较优水平组合,但未分离随机误差的影响,难以量化因素水平变化引起的试验结果波动与试验误差间的关系,导致对因素影响程度的判断不够精确^[23-24]。引入方差分析,通过误差分解与显著性检验,判断各因素是否对试验结果产生显著影响,分析差异来源,可

有效提高研究结论的统计严谨性。

采用软件 SPSS 对正交试验数据进行方差分析。设定显著性水平 $\alpha=0.05$,当误差自由度和因素自由度均为 2 时,查 F 分布临界值表^[25]可得 $F_{0.05}(2,2)=19$ 。当计算所得 $F\leq 19$ 时(发生概率 $P\geq 95\%$),接受原假设,认为该因素对玉米秸秆纤维基本属性指标无显著影响;若 $F>19(P<5\%)$,则拒绝原假设,判定该因素具有显著影响。将显著性水平 α 增至 0.01 时,临界值 $F_{0.01}(2,2)=99$ 。当 $F>99(P<1\%)$ 时,判定此因素影响具有高度显著性。同时,通过查看 P 可更精确地评估各因素的显著性。在显著性水平满足要求的情况下, F 越大且 P 越小,影响结果越显著。

评估不同因素对改性玉米秸秆纤维性能指标影响的显著性水平,分析结果如表 5、6 所示。

表 5 吸油率对玉米秸秆纤维路用性能影响的方差分析

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F	P	显著性
A	0.702	2	0.351	269.272	0.004	***
B	0.849	2	0.425	325.512	0.003	***
C	0.073	2	0.036	27.813	0.035	**
D	0.003	2	0.001			
总计	1.627	8				

注:**表示在 0.05 水平上显著;***表示在 0.01 水平上显著。

表 6 质量损失率对玉米秸秆纤维路用性能影响的方差分析

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F	P	显著性
A	0.549	2	0.274	483.753	0.002	***
B	1.151	2	0.575	1 014.640	0.001	***
C	0.029	2	0.015	25.730	0.037	**
D	0.001	2	0.001			
总计	1.730	8				

由表 5、6 可知:改性玉米秸秆纤维浸泡时间的 $F>F_{0.05}(2,2)=19$,浸泡时间对改性玉米秸秆纤维的吸油率有显著影响;蒸煮时间和 NaOH 与水的质量比的 $F>F_{0.01}(2,2)=99$,表明二者对改性玉米秸秆纤维的吸油率的影响极为显著。根据 F 及 P 排序可知,蒸煮时间对改性玉米秸秆纤维的吸油率的影响最大,其次是 NaOH 与水的质量比,浸泡时间影响最小。较长的蒸煮时间可使 NaOH 溶液与改性玉米秸秆纤维充分接触并反应,破坏木质素和半纤维素间的化学键,使纤维素纤维更易分离和暴露,改性玉米秸秆纤维的的孔隙结构显著改变,比表面积增大,为吸油提供更多空间和位点,显著提高改性玉米秸秆纤维的吸油率。

浸泡时间对改性玉米秸秆纤维的质量损失率的影响在 0.05 水平上显著($F=25.730>F_{0.05}(2,2)=19,P<5\%$)。蒸煮时间($F=1 014.640,P=0.001$)和 NaOH 与水的质量比($F=483.753,P=0.002$)的 $F>F_{0.01}(2,2)=99$,且 $P<1\%$,表明二者对改性玉米秸秆纤维的质量损失率的影响极为显著。蒸煮时间对质量损失率的影响程度比 NaOH 与水的质量比更显著。延长蒸煮时间能使 NaOH 溶液更深入地渗透改性玉米秸秆纤维内部并充分反应,去除纤维表面的大量木质素和半纤维素,降解玉米秸秆纤维中疏松的无定形区域,促使纤维素分子链的结晶度增大,减少玉米秸秆纤维的质量损失,显著提高耐热性能。NaOH 浸泡时间主要影响改性玉米秸秆纤维的表面处理效果,对内部晶体结构、分子链的破坏和重组等影响相对较小,耐热性能更多取决于改性玉米秸秆纤维的内部结构和组成,所以浸泡时间对其耐热性能的影响相对较弱。

2.4 基本属性对比评价

基于改性玉米秸秆纤维的最佳改性工艺($A_3B_3C_3$),对比分析改性前、后玉米秸秆纤维及木质素纤维的路用性能,试验结果如表 7 所示。

表 7 改性玉米秸秆纤维基本路用性能试验结果

纤维类型	吸油率/($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	质量损失率	含水率/%	pH 值	最大长度/mm
改性玉米秸秆纤维	6.899	0.636%	1.06	8.21	<6
未改性玉米秸秆纤维	5.006	燃烧现象	4.51	7.08	<6
木质素纤维	6.794	4.206%	4.28	7.31	<6
技术标准 ^[20]	5.000~9.000	≤6.000%,且无燃烧	≤5.00	6.50~8.50	≤6

由表 7 可知:改性玉米秸秆纤维的吸油率比未改性时增大 37.81%,比木质素纤维增大 1.54%。较高的吸油率有助于改性玉米秸秆纤维形成稳定的三维网络结构,减少自由沥青的迁移,改善骨料的裹覆效果,显著增强沥青混合料的高温抗车辙能力。改性玉米秸秆纤维的质量损失率比木质素纤维减少 84.88%,改性玉米秸秆纤维的热稳定性显著优于木质素纤维,能满足沥青混合料在拌和与摊铺阶段的高温稳定性要求。改性玉米秸秆纤维的含水率比未改性玉米秸秆纤维和木质素纤维明显减小,低含水率有利于改性玉米秸秆纤维的存储和运输,增强界面黏附强度,减少吸湿膨胀性,保持沥青混合料内部结构的长期稳定。改性玉米秸秆纤维的 pH 值略高于木质素纤维,最大长度小于 6 mm,均满足文献[20]的要求。

3 纤维沥青胶浆流变性能

3.1 纤维沥青胶浆高温流变性能评价

采用动态剪切流变仪对不同纤维沥青胶浆进行温度扫描试验,研究不同纤维对沥青胶浆高温黏弹性能的影响。依据文献[26]进行温度扫描试验时,固定加载频率为 10 rad/s,试验温度分别为 48、54、60、66、72 ℃,改性玉米秸秆纤维与沥青和矿粉的总质量之比为 2%,粉胶比为 1:1。通过复数模量 G^* 、相位角 δ 及车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 表征高温流变特性。 G^* 反映胶浆整体刚度, G^* 越大,高温抗变形能力越强; δ 表征黏弹性比例, δ 越小,弹性响应占比越高,抗疲劳性能越好; $G^*/\sin \delta$ 综合评估抗沥青混合料的抗车辙能力, $G^*/\sin \delta$ 越大,材料的高温稳定性越好。不同纤维沥青胶浆的高温流变性能对比如图 2 所示。

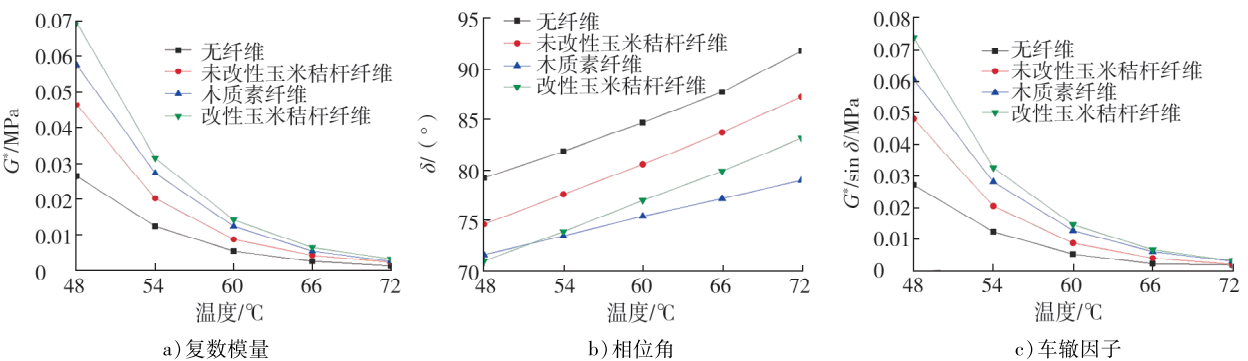


图 2 不同纤维沥青胶浆的高温流变性能对比

由图 2 可知:在沥青胶浆中加入纤维,纤维沥青胶浆的复数模量 G^* 和车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 显著增大,相位角 δ 减小,表明加入纤维增强了沥青胶浆的刚度,抑制了沥青胶浆高温下的黏性流动,使其黏弹性行为更偏向弹性主导,显著提高沥青胶浆的抗车辙能力。由图 2a) 和 c) 可知:不同纤维沥青胶浆的复数模量和车辙因子在 48~60 ℃ 明显分散,随着试验温度升高,各曲线逐渐趋近,表明不同纤维对沥青胶浆的

增强作用主要集中在 48~60 ℃,在高温下的改性效果因沥青基体软化而相对减弱。改性玉米秸秆纤维沥青胶浆的复数模量和车辙因子显著大于未改性玉米秸秆纤维及木质素纤维沥青胶浆,在试验温度 48、54 ℃ 下,改性玉米秸秆纤维沥青胶浆的复数模量比木质素纤维胶浆分别增大 20.80%、15.33%,车辙因子比木质素纤维胶浆分别增大 21.95%、15.90%。经 NaOH 溶液改性后,玉米秸秆纤维表面暴露更多极性基团,与沥青中的极性组分形成强化学吸附,优化了纤维-沥青界面的黏结效率,提高了高温稳定性和高温抗车辙性能。

3.2 纤维沥青胶浆低温流变性能评价

基于弯曲梁流变试验,根据文献[26]研究不同纤维对沥青胶浆低温抗裂性能的影响。改性玉米秸秆纤维与沥青和矿粉的总质量之比为 2%、粉胶比为 1:1,试验温度分别为-18、-12、-6 ℃。通过蠕变劲度和松弛速率评价无纤维、未改性玉米秸秆纤维、改性玉米秸秆纤维及木质素纤维沥青胶浆的低温性能,蠕变劲度反映低温瞬时刚度,蠕变劲度越小,胶浆柔韧性越好,脆性断裂风险越低;松弛速率表征应力松弛能力,松弛速率越大,材料通过黏性流动释放内应力的能力越强,抗低温开裂性能越好。不同纤维沥青胶浆的低温流变性能对比如表 8 所示。

表 8 不同纤维沥青胶浆的低温流变性能

不同纤维沥青胶浆	蠕变劲度/MPa			松弛速率		
	-18 ℃	-12 ℃	-6 ℃	-18 ℃	-12 ℃	-6 ℃
无纤维	236.588	81.674	32.458	0.369	0.477	0.590
木质素纤维	252.417	99.319	35.918	0.346	0.425	0.504
未改性玉米秸秆纤维	323.689	113.418	37.734	0.319	0.421	0.501
改性玉米秸秆纤维	257.693	92.227	35.053	0.341	0.444	0.522

由表 8 可知:加入不同纤维的沥青胶浆的蠕变劲度比无纤维沥青胶浆大,松弛速率比无纤维沥青胶浆小。原因是纤维对沥青轻质组分(如饱和分、芳香分)的吸附作用使得沥青质相对质量分数增大,沥青胶浆刚性增强,脆性增大,应力松弛能力下降,削弱了低温抗裂性。改性玉米秸秆纤维沥青胶浆的蠕变劲度在温度为-18 ℃ 时比未改性玉米秸秆纤维沥青胶浆减小 20.39%,且与木质素纤维沥青胶浆的蠕变劲度曲线高度重合,表明二者的低温流变性能相当。改性玉米秸秆纤维沥青胶浆的松弛速率明显比未改性沥青胶浆大。NaOH 溶液处理玉米秸秆纤维提高了玉米秸秆纤维的表面粗糙度和极性基团密度,增强了纤维-沥青界面相容性,减少界面应力集中,增强应力松弛能力。在试验温度为-12 ℃ 时,改性玉米秸秆纤维沥青胶浆的松弛速率比木质素纤维胶浆增大 5.27%,表明其低温应力松弛能力更优,综合流变性能优于木质素纤维。

4 结论

通过三因素三水平正交试验优化玉米秸秆纤维改性工艺,结合极差分析与方差分析揭示 NaOH 与水的质量比、蒸煮时间和浸泡时间等参数对改性玉米秸秆纤维的影响规律,并通过胶浆流变性能对比验证玉米秸秆纤维替代木质素纤维的技术可行性。

1) 玉米秸秆纤维改性工艺参数对其吸油率和质量损失率均有显著影响,玉米秸秆纤维吸油率明显增大,质量损失率大幅减小,影响程度按从大到小依次排序为蒸煮时间、NaOH 与水的质量比、浸泡时间;当蒸煮时间由 0.5 h 增至 1.5 h,吸油率增大 13.39%,质量损失率减小 49.46%,改性后的玉米秸秆纤维具有良好吸油性和耐热性。

2) 通过参数优化获得玉米秸秆纤维的最佳改性工艺参数分别为:NaOH 与水的质量比为 6%、蒸煮 1.5 h、浸泡 1.5 h;最佳改性条件下玉米秸秆纤维的吸油率较木质素纤维增大 1.54%,质量损失率减

小84.88%。

3) 试验温度为48℃下,改性玉米秸秆纤维沥青胶浆的复数模量和车辙因子比木质素纤维沥青胶浆分别增大20.80%、21.95%;试验温度为-12℃时,改性玉米秸秆纤维沥青胶浆的松弛速率比木质素纤维胶浆增大5.27%,二者的蠕变劲度相当,高温稳定性和低温抗裂性优于木质素纤维,将改性玉米秸秆纤维替代木质素纤维用于沥青路面施工具有一定的可行性。

参考文献:

- [1] 刘卫东,黄志鹏,张仰鹏,等.路用蔗渣纤维制备及应用研究[J].公路,2024,69(9):28-36.
- [2] 黎多迅.蔗渣纤维用量对SMA-13混合料马歇尔指标的影响[J].山东交通学院学报,2024,32(4):65-72.
- [3] 陈彦君,戴杰,单军强,等.我国纤维素乙醇的研究进展和发展趋势[J].化工进展,2025,44(5):2541-2562.
- [4] GUO Y F, TATARANNI P, SANGIORGI C. The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the art review[J]. Construction and Building Materials, 2023, 390: 131754.
- [5] THEJASWI P, VENGALA J, DHAREK M S, et al. Sugarcane bagasse fibers for enhancing moisture susceptibility properties in stone mastic asphalt[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2023, 2023(1):5378738.
- [6] 董航宇,田鹏,彭开兴,等.玉米秸秆纤维的制备及对沥青性能影响的研究[J].吉林建筑大学学报,2022,39(5):33-39.
- [7] 李振霞,陈渊召,周建彬,等.玉米秸秆纤维沥青混合料路用性能及机理分析[J].中国公路学报,2019,32(2):47-58.
- [8] SÁNCHEZ M L, CAPOTE G, PATINO J P. Effect of surface treatment of fibers on the accelerated aging of biocomposites[J]. Construction and Building Materials, 2021, 271:121875.
- [9] 徐豪,王琨,樊丽然,等.新型沥青混合料掺加料玉米秸秆纤维的制备工艺及改性方法[J].山东交通学院学报,2023,31(2):102-108.
- [10] 刘卫东,张洪刚,熊剑平,等.NaOH改性蔗渣纤维及其沥青胶浆性能研究[J].公路,2023,68(1):294-301.
- [11] 王梦梦,李祖仲,庞萧萧,等.蔗渣纤维应用研究进展[J].应用化工,2020,49(12):3132-3136.
- [12] 盛博晗,盛燕萍,崔适安,等.竹纤维预处理对沥青胶浆流变和开裂特性的影响[J].西安科技大学学报,2024,44(4):778-785.
- [13] WANG K, LI X A, HU P, et al. Influence of modified stalk fibers on the fatigue performance of asphalt binder[J]. Coatings, 2023, 13(11):13111912.
- [14] WANG K, QU L, TANG L, et al. Investigation on the performance of modified corn stalk fiber AC-13 asphalt mixture[J]. Coatings, 2024, 14(4):436.
- [15] 任德志,白雪卫,刘德军,等.玉米秸秆皮瓢分离碾压揭皮辊设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(1):93-99.
- [16] LUO Z F, LI P, CAI D, et al. Comparison of performances of corn fiber plastic composites made from different parts of corn stalk[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 95:521-527.
- [17] 陈梓宁.玉米秸秆纤维沥青吸附机制及其SMA路用性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [18] 唐亮,谢丹丹,张晓飞,等.植物纤维质量分数对沥青混凝土路用性能的影响研究[J].湖南交通科技,2025,51(2):75-79.
- [19] 钟建宏.秸秆纤维吸附沥青机制及其在沥青混合料中的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [20] 全国交通工厂设施(公路)标准化技术委员会(SAC/TC 223).沥青路面用纤维:JT/T 533—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
- [21] 马峰,王雨涵,傅珍,等.玄武岩纤维沥青胶浆高低温性能影响因素探究[J].化工新型材料,2022,50(6):258-262.
- [22] 张亚云.蔗渣纤维表面改性及其沥青胶浆性能研究[D].西安:长安大学,2020.
- [23] SADEGHIAN M, LATIFI NAMIN M, GOLI H. Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modifier[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226:818-826.
- [24] 曹青霞,王云.SMA-13石墨复合橡胶沥青混合料性能优化研究[J].公路,2023,68(4):347-352.
- [25] 姜鹏,孙华东,丁永玲,等.沥青基碳纤维改性沥青老化性能影响因素研究[J].山东交通学院学报,2020,28(2):70-76.
- [26] 中华人民共和国交通运输部,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:JTGE 20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

Optimization of corn straw fiber preparation process and rheological properties of modified asphalt mastic

XIE Dandan¹, WANG Kun^{1*}, LI Qiangfei¹, SUN Xingchen¹,
JIANG Ziyu¹, TANG Liang²

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Province Road and Bridge Group Co., Ltd., Jinan 250014, China

Abstract: To promote the high-value utilization of agricultural solid waste in road engineering, a preparation and optimization process for corn straw fiber is proposed. Under the modification parameters of fibers with a mass ratio of NaOH to water of 4%, 5%, and 6%, and cooking for 0.5, 1.0, and 1.5 hours, as well as soaking for 0.5, 1.0, and 1.5 hours, the synergistic effects of modification parameters on the oil absorption and heat resistance of the fibers are studied based on orthogonal experiments, range analysis, and variance analysis. Dynamic shear rheology and bending beam rheology tests are used to measure the high and low-temperature rheological properties of unmodified corn straw fibers, modified corn straw fibers, lignocellulosic fibers, and fiber-free asphalt mastic, verifying the technical feasibility of replacing lignocellulosic fibers with corn straw fibers. The results show that NaOH modification significantly increases the oil absorption rate of corn straw fibers and reduces their mass loss. The degree and significance of the influence of each modification parameter on fiber oil absorption and heat resistance are arranged in descending order as follows: cooking time, mass ratio of NaOH to water, and soaking time. The optimal modification process combination for corn straw fibers is a NaOH to water mass ratio of 6%, cooking for 1.5 hours, and soaking for 1.5 hours. Under the optimal modification conditions, the oil absorption rate of modified corn straw fibers increases by 1.54% compared to lignocellulosic fibers, and the mass loss decreases by 84.88%. The complex modulus, rutting factor, and creep rate of modified corn straw fiber asphalt mastic increase by 20.80% (48 °C), 21.95% (48 °C), and 5.27% (−12 °C), respectively, compared to lignocellulosic fiber asphalt mastic, with both having comparable stiffness moduli. Corn straw fibers used for asphalt modification provide both high-temperature stability and low-temperature crack resistance, making them a viable substitute for lignocellulosic fibers in asphalt pavement construction.

Keywords: corn straw fiber; range analysis; variance analysis; asphalt mastic; rheological property

(责任编辑:王惠)