

改性玉米秸秆纤维 SMA-13 路用性能试验研究

曲璐¹, 王琨^{1*}, 朱玉珠², 李雄傲¹

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 淄博市淄川区交通运输局, 山东 淄博 255100

摘要:为研究改性玉米秸秆纤维对玛蹄脂碎石混合料(stone matrix asphalt, SMA)-13 路用性能的影响,在沥青混合料中加入质量分数分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%,长度分别为 3、6、9 mm 的改性玉米秸秆纤维,对沥青混合料进行车辙试验、小梁弯曲低温试验、冻融劈裂试验和铺面长期性能试验。试验结果表明:沥青混合料加入改性玉米秸秆纤维可提高动稳定度、最大弯拉应变、冻融劈裂强度比,减小因重复荷载作用而产生的车辙深度;改性玉米秸秆纤维质量分数较小时,随改性玉米秸秆纤维长度的增大,沥青混合料的路用性能增强,改性玉米秸秆纤维质量分数较大时,随改性玉米秸秆纤维长度的增大,沥青混合料的路用性能先增大后减小;改性玉米秸秆纤维长度相同时,随其质量分数的增大,沥青混合料的路用性能先增强后减弱,改性玉米秸秆纤维长度分别为 3、6、9 mm,质量分数分别为 0.8%、0.6%、0.4%时,沥青混合料路用性能最佳,其中改性玉米秸秆纤维长 6 mm、质量分数为 0.6%的沥青混合料路用性能最佳。

关键词:SMA-13;路用性能;改性玉米秸秆纤维;纤维长度;纤维质量分数

中图分类号:U447;U442.5⁺9

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)01-0068-06

引用格式:曲璐,王琨,朱玉珠,等. 改性玉米秸秆纤维 SMA-13 路用性能试验研究[J]. 山东交通学院学报, 2025,33(1):68-73.

QU Lu, WANG Kun, ZHU Yuzhu, et al. Experimental study on road performance of modified corn stalk fiber SMA-13[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025,33(1):68-73.

0 引言

在沥青混合料中掺入纤维,可在一定程度上提高沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性等路用性能^[1-3]。常用的纤维材料有矿物纤维、合成纤维和木质素纤维,木质素纤维吸附沥青混合料中的自由沥青能力较强,对沥青混合料的路用性能提高效果显著,应用广泛^[4-5]。大部分木质素纤维来源于原木,大规模使用会导致森林资源减少,违背道路建设的可持续发展原则^[6-7]。

玉米秸秆纤维是环保、可再生的绿色材料,可规模化制备后掺入沥青混合料中,分析其在道路工程的性能^[8-10]。徐豪等^[11]采用 NaOH 改性玉米秸秆纤维,发现当沥青混合料中改性剂的质量分数为 5%,浸泡 30 min 后,路用性能明显优于未改性玉米秸秆纤维,改性玉米秸秆纤维的技术参数与木质素纤维相当。Chen 等^[12]发现加入改性玉米秸秆纤维能显著增大沥青胶浆的软化点和复数模量,减小针入度和相位角。Wang 等^[13]发现改性玉米秸秆纤维的质量分数为 1.5%~2.0%时,沥青混合料路用性能最佳。陈梓宁^[14]发现在玛蹄脂碎石混合料(stone matrix asphalt, SMA)-13 中的路用性能在改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.6%时最佳。现有研究主要集中于路用玉米秸秆纤维的改性工艺、单一因素条件下纤维质量

收稿日期:2024-07-18

基金项目:山东省交通运输科技计划项目(2022B109)

第一作者简介:曲璐(1999—),女,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:shixiaoluya2022@163.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,主要研究方向为路面材料,E-mail:204053@sdjtu.edu.cn。

分数对沥青胶浆和沥青混合料性能的影响,在多因素条件下,研究纤维质量分数和纤维长度对沥青混合料的路用性能的影响相对较少^[15-16]。

本文采用车辙试验、小梁弯曲低温试验、冻融劈裂试验和铺面性能试验,系统评价改性玉米秸秆纤维沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和铺面长期性能,探讨沥青混合料在改性玉米秸秆纤维不同长度和质量分数下的道路性能,为玉米秸秆纤维沥青混合料在道路施工上的广泛应用提供理论依据。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

采用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物(Styrene-Butadiene-Styrene,SBS)(I-D)改性沥青,技术指标如表 1 所示。絮状木质素纤维和自制改性玉米秸秆纤维主要性能指标如表 2 所示。将玉米秸秆通过万能粉碎机制得秸秆纤维,经过泡水、机械粉碎、晾干、筛分、NaOH 溶液浸泡、冲洗、烘干等^[17]工艺制得改性玉米秸秆纤维。选择优质玄武岩为粗细集料,精细研磨的石灰岩粉为矿粉,材料性能均符合文献[18]的相关要求。

表 1 沥青主要技术指标

项目	针入度 ^① / (0.1 mm)	针入 度指 数	软化 点/℃	运动 黏度 ^② / (Pa·s)	延度 ^③ /cm	闪点/ ℃	溶解 度/%	弹性 恢复 ^① /%	薄膜烤箱试验后残留物		
									质量 变化/%	残留针 入度比 ^① / %	延度 ^③ / cm
测试结果	55	0.7	80.5	1.4	33	248	99.87	98	-0.180	78	18
技术要求 ^[18]	40~60	≥60.0	≥60.0	≤3.0	≤20	≥230	≥99.00	≥75	≤±1.000	≥65	≥15

①温度为 25℃。②温度为 135℃。③温度为 5℃。

表 2 改性玉米秸秆纤维主要性能指标

材料	颜色	纤维长度/mm	灰分质量分数/%	pH 值	吸油倍数	热失重率/%
木质素纤维	浅灰	<6	18.7	8.40	8.13	5.6
改性玉米秸秆纤维	浅黄	3、6、9	5.8	8.75	6.30	5.6

1.2 配合比设计

采用 SMA-13 沥青混合料,粒径分别为>10~15 mm、>5~10 mm、0~5 mm 集料、矿粉的质量比为 41:34:15:10。通过马歇尔试验法确定不同质量分数 w 下不同改性玉米秸秆纤维长度的沥青混合料的最佳油石比,结果如表 3 所示。在沥青混合料中木质素纤维的质量分数为 0.3%^[19-20],所制备的沥青混合料 L-0.3%的最佳油石比为 6.12%。

表 3 不同质量分数、改性玉米秸秆纤维长度下沥青混合料的最佳油石比

纤维 长度/mm	最佳油石比				
	$w=0.2\%$	$w=0.4\%$	$w=0.6\%$	$w=0.8\%$	$w=1.0\%$
3	5.62	5.72	5.84	6.06	6.22
6	5.54	5.66	5.78	5.94	6.26
9	5.84	5.92	6.04	6.26	6.42

1.3 试验方法

通过车辙试验测试不同沥青混合料试件的高温稳定性。将不同改性玉米秸秆纤维长度、质量分数的

的 SMA-13 级配车辙板及 L-0.3% 车辙板放入 $(60\pm1)^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱中保温 5 h (不超过 12 h), 将保温良好的车辙板安装在自动车辙仪的试验台上, 试验轮压力为 0.7 MPa, 碾压速度为 42 次/min, 往复碾压, 碾压 1 h 后结束试验, 计算动稳定度。

通过小梁弯曲低温试验测试不同沥青混合料试件的低温抗裂性。将棱柱体小梁放在恒温 $(-10^{\circ}\text{C}\pm 0.5^{\circ}\text{C})$ 环境箱中保温 1 h, 将保温好的试件置于模块化机电伺服驱动沥青试验机上, 以恒定加载速率对试件施加荷载直至试件破坏, 计算最大弯拉应变。

通过冻融劈裂试验测试不同沥青混合料试件的水稳定性。将 4 个马歇尔试件放入温度为 25°C 的水浴箱中保温 2.5 h, 另外 4 个马歇尔试件先放入温度为 -18°C 的环境箱中冷却 16 h, 随后放入温度为 60°C 的恒温水浴中保温 24 h, 并转移恒温 (25°C) 水槽中保温 2 h, 保温结束后将试件置于马歇尔试验仪上, 加载速度为 50 mm/min 至试件破坏, 计算冻融劈裂强度比。

通过加速加载试验测试不同沥青混合料试件的铺面长期性能。课题组自主研发的铺面性能智能检测设备如图 1 所示。此设备由温度控制系统及加速加载系统构成, 可测试在不同温度、不同行车荷载的共同作用下沥青混合料的抗车辙能力, 也可测试单一环境条件下沥青混合料的长期性能。



图 1 铺面长期性能智能监测设备

对最佳纤维质量分数下 3 种改性玉米秸秆纤维长度的沥青混合料及 L-0.3% 车辙试件进行长期性能监测, 研究不同纤维沥青混合料在不同荷载作用下的车辙变化规律。试验温度为 60°C , 荷载分别为 0.7、0.9、1.1 MPa, 转速为 10 r/min, 车轮每加载 3 000 次时记录 1 次车辙深度, 加载 27 000 次时结束试验。

2 试验结果与分析

2.1 高温稳定性

不同改性玉米秸秆纤维长度、质量分数下, 沥青混合料试件的动稳定度如表 4 所示。L-0.3% 的动稳定度为 4 995 次/mm。

表 4 不同纤维长度、质量分数下沥青混合料的动稳定度

纤维长度/mm	动稳定度/(次 $\cdot\text{mm}^{-1}$)				
	$w=0.2\%$	$w=0.4\%$	$w=0.6\%$	$w=0.8\%$	$w=1.0\%$
3	4 332	4 780	4 950	5 261	5 023
6	4 482	4 995	5 303	5 290	5 062
9	5 012	5 250	5 010	4 785	4 480

由表4可知:1)改性玉米秸秆纤维沥青混合料的动稳定度随改性玉米秸秆纤维在沥青混合料中质量分数的增大而先增大后减小,改性玉米秸秆纤维长度分别为3、6、9 mm,质量分数分别为0.8%、0.6%、0.4%时,改性玉米秸秆纤维沥青混合料的动稳定度最大,相应质量分数为对应长度改性玉米秸秆纤维沥青混合料动稳定度的最佳质量分数。2)改性玉米秸秆纤维长度为3 mm,质量分数分别为0.8%和1.0%时,或长度为6 mm,质量分数分别为0.6%、0.8%和1.0%时,或长度为9 mm,质量分数分别为0.2%、0.4%和0.6%时,沥青混合料的动稳定度均大于L-0.3%。

可通过适当增大改性玉米秸秆纤维的质量分数或选择较长的改性玉米秸秆纤维,在SMA-13中获得与木质素纤维相似的高温性能增强效果。随纤维质量分数的增大,改性玉米秸秆纤维在沥青混合料内部有效搭接形成紧密的三维网络结构,发挥加筋、增韧作用,提高沥青混合料的高温稳定性^[21]。但改性玉米秸秆纤维质量分数过大,沥青混合料内部易出现纤维结团、凝聚等现象,降低纤维骨架网络结构的稳定性沥青混合料高温性能。

2.2 低温抗裂性

不同改性玉米秸秆纤维长度、质量分数下沥青混合料的最大弯拉应变结果如表5所示。通过小梁弯曲低温试验可知,L-0.3%的最大弯拉应变变为 $2\ 613\times 10^{-6}$ 。

表5 不同纤维长度、质量分数下沥青混合料的最大弯拉应变

纤维长度/mm	最大弯拉应变/ 10^{-6}				
	$w=0.2\%$	$w=0.4\%$	$w=0.6\%$	$w=0.8\%$	$w=1.0\%$
3	2 386	2 509	2 672	2 738	2 706
6	2 476	2 602	2 830	2 784	2 650
9	2 637	2 811	2 701	2 553	2 480

由表5可知:1)改性玉米秸秆纤维的最大弯拉应变随纤维在沥青混合料中质量分数的增大而先增大后减小,改性玉米秸秆纤维长度分别为3、6、9 mm,质量分数分别为0.8%、0.6%、0.4%时,改性玉米秸秆纤维沥青混合料的最大弯拉应变最大,相应质量分数为对应长度改性玉米秸秆纤维沥青混合料最大弯拉应变的最佳质量分数。2)掺入长度分别为3、6 mm,质量分数分别为0.6%、0.8%、1.0%,或长度为9 mm,质量分数分别为0.2%、0.4%、0.6%的改性玉米秸秆纤维时,沥青混合料的最大弯拉应变均大于L-0.3%。

可通过适当增大改性玉米秸秆纤维的质量分数或选择较长的改性玉米秸秆纤维,使其在沥青混合料中低温性能改善效果与0.3%木质素纤维相同。不同长度及质量分数对改性玉米秸秆纤维沥青混合料低温性能改善效果存在差异。改性玉米秸秆纤维长度增大,最佳质量分数减小,原因是长纤维和高质量分数会使沥青混合料中的纤维团更易相互缠绕,出现应力集中现象,诱发裂缝产生。为满足沥青混合料的低温使用要求,须合理选择改性玉米秸秆纤维长度及质量分数。

2.3 水稳定性

不同改性玉米纤维长度、质量分数下沥青混合料的冻融劈裂试验强度比如表6所示。由冻融劈裂试验可知,L-0.3%的冻融劈裂试验强度比为80.32%。

表6 不同纤维长度、质量分数下沥青混合料的冻融劈裂试验强度比

纤维长度/mm	冻融劈裂强度比/%				
	$w=0.2\%$	$w=0.4\%$	$w=0.6\%$	$w=0.8\%$	$w=1.0\%$
3	79.19	79.82	81.78	83.13	81.96
6	79.63	82.65	84.12	83.46	82.13
9	80.56	83.10	82.20	80.98	79.30

由表6可知:1)改性玉米秸秆纤维的冻融劈裂试验强度比随改性玉米秸秆纤维在沥青混合料中质量分数的增大而先增大后减小,改性玉米秸秆纤维长度分别为3、6、9 mm,质量分数分别为0.8%、0.6%、0.4%时,改性玉米秸秆纤维沥青混合料的冻融劈裂试验强度比最大,相应质量分数为对应长度改性玉米秸秆纤维沥青混合料冻融劈裂试验强度比的最佳质量分数。2)掺入长3 mm,质量分数分别为0.6%、0.8%、1.0%的改性玉米秸秆纤维,或长6 mm,质量分数分别为0.4%、0.6%、0.8%、1.0%,或长9 mm,质量分数分别为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%时,改性玉米秸秆纤维沥青混合料的冻融劈裂试验强度比均大于L-0.3%。

可通过适当增大改性玉米秸秆纤维的质量分数或选择较长的改性玉米秸秆纤维,在SMA-13中获得与木质素纤维相似的水稳定性增强效果。随改性玉米秸秆纤维质量分数的增大,不同长度纤维可增强改性玉米秸秆纤维与沥青间的吸附作用,构建纤维与沥青相互交织的骨架结构,增大集料表面的沥青膜覆盖厚度及沥青与集料间的黏附力,进行冻融循环劈裂试验后,改性玉米秸秆纤维沥青混合料的沥青剥落率较低,劈裂强度较高。

2.4 铺面长期性能

由2.1~2.3节可知,长3、6、9 mm的改性玉米秸秆纤维在沥青混合料的最佳质量分数分别为0.8%、0.6%、0.4%,分别记为C-3-0.8%、C-6-0.6%、C-9-0.4%。最佳纤维质量分数下,不同长度的改性玉米秸秆纤维及L-0.3%铺面长期性能试验结果如图2所示,模拟路面压强为0.7~1.4 MPa的不同交通荷载。

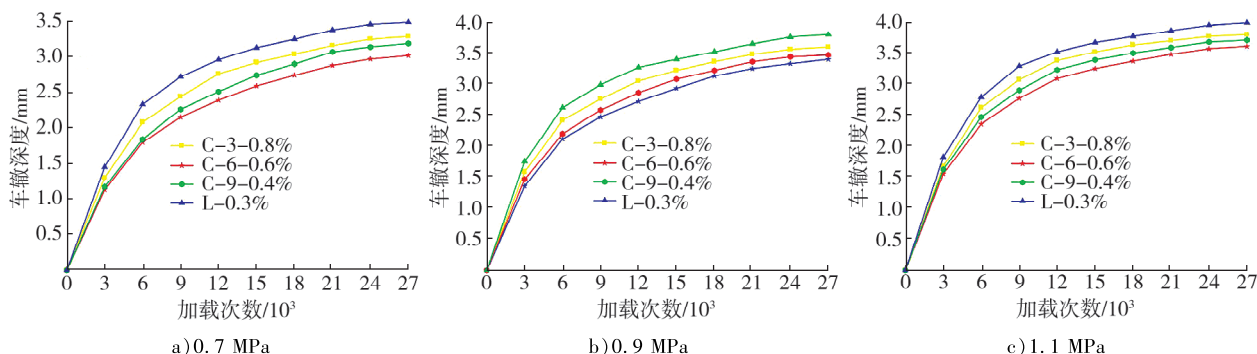


图2 不同交通荷载下铺面长期性能试验结果

由图2可知:在4种纤维沥青混合料中,车辙深度的增长方式相似。随加载次数增大,车辙深度初期增速较快,曲线斜率较大,但随时间推移,增速放慢。主要原因是加载次数达到6 000前,沥青混合料处于骨料的压实阶段,在外荷载作用下排出间隙中空气,内部嵌合更紧密。进入沥青混合料流动阶段,沥青混合料在压密阶段的密实度增大,车辙深度增速较缓。随荷载水平增大,改性玉米秸秆纤维以最佳质量分数掺入沥青混合料时,车辙深度均小于木质素纤维沥青混合料,表明改性玉米秸秆纤维在提升沥青混合料的耐久性方面效果更显著,在沥青路面施工领域具备替代木质素纤维的潜力,为工程材料的绿色化与可持续发展提供新选择。

3 结论

1)在沥青混合料中掺入改性玉米秸秆纤维,提高沥青混合料的动稳定度、最大弯拉应变和冻融劈裂强度,车辙深度减小。

2)改性玉米秸秆纤维沥青混合料的动稳定度、最大弯拉应变和冻融劈裂强度比随纤维长度增大而先增大后减小;随加载次数增大,车辙深度初期增速较快,曲线斜率较大,但随时间推移,增速放慢。

3)在沥青混合料中掺入长6 mm、质量分数为0.6%的改性玉米秸秆纤维,沥青混合料的高温性能、低温性能、水稳定性及铺面长期性能最佳,且优于木质素纤维质量分数为0.3%的沥青混合料。

参考文献:

- [1] 陈闯闯. 不同种类纤维 SMA-13 沥青混合料性能试验研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.

- [2] 李祖仲,李梦园,刘卫东,等. 蔗渣纤维表面改性及其沥青混合料路用性能[J]. 吉林大学学报(工学版),2024,54(6):1738-1745.
- [3] LIU J Y, LI Z Z, CHEN H X, et al. Investigation of cotton straw fibers for asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(5): 04020105.
- [4] LIU F, PAN B F, BIAN J R, et al. Experimental investigation on the performance of the asphalt mixture with ceramic fiber[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 384: 135585.
- [5] ENIEB M, DIAB A, YANG X. Short-and long-term properties of glass fiber reinforced asphalt mixtures[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(1/2): 64-76.
- [6] 牛兆旭. 大掺量橡胶/聚酯纤维 SMA 沥青混合料低温抗裂性能研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2022.
- [7] 雷胜友,惠会清. 纤维沥青混合料强度的理论研究与试验验证[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(5): 174-179.
- [8] ZHAO H, GUAN B W, XIONG R, et al. Investigation of the performance of basalt fiber reinforced asphalt mixture[J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 10051561.
- [9] LUO D, KHATER A, YUE Y C, et al. The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: a review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 377-387.
- [10] 王玉林,卢东,徐宁. 木质素纤维对再生透水沥青混合料路用性能研究[J]. 公路,2021,66(2):52-56.
- [11] 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.
- [12] CHEN Z N, YI J Y, CHEN Z G, et al. Properties of asphalt binder modified by corn stalk fiber[J]. Construction and Building Materials,2019,212:225-235.
- [13] WANG K, WU Q, HU P, et al. Road performance and microscopic mechanism analysis of modified straw fiber asphalt binder[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2023,2023:2328556.
- [14] 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.
- [15] 熊余康. 生物质纤维沥青混合料路用性能研究[D]. 南京:南京林业大学,2023.
- [16] CHEN Z N, CHEN Z G, YI J Y, et al. Application of corn stalk fibers in SMA mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(7): 04021147.
- [17] CHEN Z N, CHEN Z G, YI J Y, et al. Preparation method of corn stalk fiber material and its performance investigation in asphalt concrete[J]. Sustainability,2019,11(15):11154050.
- [18] 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: JTG E20—2011 [S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [19] 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.
- [20] 马峰,潘健,傅珍,等. 纤维沥青混合料最佳纤维掺量的确定[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(5): 138-145.
- [21] TAO H, LIU H M, YANG J, et al. Evaluation of biomass solid waste as raw material for preparation of asphalt mixture [J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2023, 22(1): 511-516.

Experimental study on road performance of modified corn stalk fiber SMA-13

QU Lu¹, WANG Kun^{1*}, ZHU Yuzhu², LI Xiongao¹

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

2. Zibo Zichuan District Transportation Bureau, Zibo 255100, China

Abstract: To study the effect of modified corn straw fibers on the performance of stone matrix asphalt (SMA)-
(下转第 81 页)